

Systém řízení baterií

Battery management system

Bc. Jan Čverčko

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Vladislav Damec, Ph.D.

Ostrava 2021

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Čverčko**

Studijní program: N0714A060006 Aplikovaná elektronika
Téma: Systém řízení baterií
Battery management system

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Provedte rešerši aktuálně známých koncepcí systému balancování a ochrany sériově řazených článků v akumulátorových bateriích
2. Zvolte vhodnou koncepci balancování s ohledem na minimalizaci výkonových ztrát použitých výkonových polovodičových součástek
3. Provedte analýzu funkce zvolené koncepce a návrh vhodného algoritmu řízení při použití v akumulátorech s články typu LiFePO₄
4. Navrhněte a podle dohody s vedoucím diplomové práce realizujte řídicí systém akumulátorové baterie (BMS) pro zvolenou koncepci balancéru s aplikací navrženého řídicího algoritmu
5. Ověřte funkčnost navrženého řídicího systému prostřednictvím simulací nebo měřením, podle dohody s vedoucím diplomové práce

Seznam doporučené odborné literatury:

1) Webová stránka:

Aktivní balancer baterií. Vývoj.HW.cz [online]. 2019 [cit. 2020-09-20]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/aktivni-balancer-baterii.html>

2) Semestrální práce z VUT

SEJKORA, Petr. OBVODY ZAJIŠŤUJÍCÍ SPRÁVNÉ NABÍJENÍ A VYBÍJENÍ AKUMULÁTORŮ LiFePO₄. Brno, 2013. Semestrální práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

3) Disertační práce ze ZČU

VALDA, Lukáš. Metody a algoritmy vyvažování sériově řazených lithiových článků. Plzeň, 2016. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.

4) Kniha

ANDREA, Davide. Battery Management Systems for Large Lithium-ion Battery Packs. Artech House, 2010. ISBN 9781608071050

5) Článek

VALDA, Lukáš a Kamil KOSTURIK. Comparison of Li-ion active cell balancing methods replacing passive cell balancer. In: 2015 International Conference on Applied Electronics. Plzeň: University of West Bohemia, 2015, s. 267-270. ISBN 978-80-261-0385-1. ISSN 1803-7232

Prohlášení studenta:

„Potvrzuji tímto odevzdání své digitální kvalifikační práce. Prohlašuji, že jsem tuto kvalifikační práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

„With this I confirm submission of my digital qualification work. I declare that I worked out it independently. I listed all literature and publications from which I had taken information.“

30.4.2021

datum

Bc. Jan Čverčko

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval pedagogům a pracovníkům Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, se kterými jsem se během studia setkal, za vědomosti a zkušenosti, které jsem díky nim získal, hlavně pak Panu Ing. Janu Strossovi, který i přes rutinní školní osnovy dokázal přednášet o nejmodernějších způsobech řízení měničů, byl k mým dotazům plně vstřícný a poskytoval podnětné rady, Panu Ing. Vladislavu Dameci, Ph.D., jež doplnil mé studium o velice bohaté zkušenosti z praxe a díky, jemuž bylo vytvořeno toto zajímavé a aktuální téma, a Panu Ing. Stanislavu Hejdukovi, Ph.D., který rychle a detailně dokázal shrnout potenciál 3D tiskáren a jejich tiskových materiálů.

Také děkuji rodině a přátelům, kteří mi byli oporou a vytvořili podmínky ve kterých jsem byl schopen studovat a dokončit tuto práci.

Zvlášť ještě děkuji těm, kteří mi pomáhali s jazykovou korekturou mé práce.

Abstrakt (Abstract):

V této práci jsou shrnuty elektrické vlastnosti baterií LiFePo₄ v závislostech na teplotě, stavu nabití, stáří baterie, jsou zmíněny i dynamické vlastnosti a možnosti modelování.

Byl proveden výčet základních ochranných a vyvažovacích topologií s popisem funkce a simulací dvou vybraných topologií.

Výstupem práce je navržený algoritmus pro systém řízení baterií, simulační model řídicího obvodu se silovým obvodem typu blokujícího měniče, výsledky těchto simulací a popis jednotlivých částí.

This thesis summarizes electrical parameters dependences of LiFePo₄ batteries for temperature, state of charge, ageing of battery, their dynamic and modeling methods are mentioned as well.

There is a list of basic protect and balancing circuits with description of their function and simulation of two chosen circuits.

Output of this thesis is designed algorithm of controlling battery management system, simulation model of controlling battery management system circuit with used Fly-back power circuit, results of simulations and description of parts.

Klíčová slova (key words):

algoritmus, balancér, balancér aktivní, balancér pasivní, balancér se spínači, balancér s transformátorem, baterie, blokující měnič, BMS, dolní balancování, horní balancování, indukčnost, LiFePo₄, měkké spínání, nabíjení, ochranné obvody, odlehčovací obvody, operační zesilovače, simulace, systém řízení baterií, transformátor, vybíjení, vypínací ztráty, vyvažovače

active balancer, algorithm, balancer, balancer with switches, balancer with transformer, battery, battery management system, BMS, charging, discharging, equalizer, fly-back converter, inductance, LiFePo₄, lower balancing, operational amplifiers, passive balancer, protection circuits, simulation, snubber circuits, soft switching, switching losses, transformer, upper balancing

Obsah:

Úvod:.....	1
1. Elektrické parametry článků.....	3
1.1. sériový odpor R_i	3
1.2. Napětí.....	4
1.3 Kapacita.....	5
2. Balancování a ochrana skládaných baterií	7
2.1. Ochranná kritéria článků	7
2.2. Známé topologie ochranných a vyvažovacích obvodů	8
2.2.1. Ochranné obvody	8
2.2.2. Vyvažovací topologie pasivní (ztrátové).....	9
2.2.3. Vyvažovací topologie aktivní se spínači (redistribuční z článku do článku)	9
2.2.3. Vyvažovací topologie aktivní s transformátory (fly-back)	11
3. Simulační analýza baterie 4S1P a balancovacích systémů.....	18
3.1. Teoretický model baterie.....	18
3.2. Použitý model baterie.....	18
3.3. Simulační schéma baterie s pasivním balancováním	20
3.3.1. Simulační výsledky baterie s pasivním balancováním	21
3.4. Simulační schéma baterie s aktivním balancováním typu fly-back	22
3.4.1. Simulační výsledky baterie s aktivním balancováním typu fly-back	23
4. Návrh řídicího algoritmu a realizace řídicího obvodu pro aktivní fly-back balancér	24
4.1. Blokové schéma navrhovaného řídicího obvodu	24
4.2. Vývojový diagram navrhovaného řídicího obvodu.....	24
4.3. Realizace simulačního modelu.....	25
4.4. Napěťová část řídicího algoritmu.....	25
4.4.1. Měření jednotlivých napětí článků	25
4.4.2. Okénková komparace s nastavitelnou hysterezí.....	26
4.4.3. Člen maximálního a minimálního napětí v sérii s hlídáním rozdílu napětí.....	26
4.4.4. Vyhodnocovací výstupní člen napěťové regulace.....	27
4.4.5. Simulační výsledky	27
4.4.6. Popis simulačních výsledků	34
4.5. Regulace odchylky dle proudu	35

4.5.1. Zpracování signálu z proudového čidla.....	35
4.5.4. Převod veličiny proudu na hodnotu požadované střídavy	36
4.5.5. Integrační člen pro eliminaci odchylky	37
4.5.6. Simulační výsledky	37
Závěr:	42
Literatura:	43
Seznam příloh:	45

Seznam symbolů zkratek:

Zk./sym.	Celý anglický název	Celý český název
OCV	: Open circuit voltage of battery	Svorkové napětí baterie bez zátěže
SoC	: State of charge	Stav nabití baterie
SoH	: State of Health	Stav stáří baterie
Ri	: Internal resitnance	Vnitřní odpor
4S1P	: S serial count, P parallel count	S sériový počet, P paralelní počet
LiFePO ₄	: Lithium-iron-phosphate battery	Lithium-železo-fosfátový akumulátor
LFP	: Lithium-iron-phosphate battery	Lithium-železo-fosfátový akumulátor
Li-POL	: Lithium-polymer battery	Lithium-polymerový akumulátor
LTO	: Lithium-titanate-oxide battery	Lithium-titanový akumulátor
NiMH	: Nickle-metal hydride battery	Nikl-metal hydridový akumulátor
CC	: Constant current	Konstantní proud
CV	: Constant voltage	Konstantní napětí
C-rate	: Capacity rate	Kapacitní míra
Ah, As	: Ampere-hour, Ampere-second	Amper hodina, Amper sekunda
MOSFET	: Metal oxid semiconductor field efect tranzistor	
Fly-back	: Fly-back converter	Zpětně propustný blokující měnič
R _{dson}	: MOSFET on state resistance	Odpor sepnutého MOSFETu
U _{th}	: MOSFET treshold voltage	Prahové napětí MOSFETu
gate	: MOSFET Driving pin	Řídicí elektroda MOSFETu
U _{nab}	: Charger voltage	Napětí nabíječky
U _s	: MOSFET source voltage	Napětí na elektrodě source MOSFETu
U _g	: MOSFET gate voltage	Napětí na elektrodě gate MOSFETu
U _{gs}	: MOSFET gate-source voltage	Napětí mezi gate a source MOSFETu
U _B	: Battery voltage	Napětí baterie
PWM	: Pulse widht modulation	Pulzně šířková modulace
U _{OC}	: Open circuit voltage of battery	Svorkové napětí baterie bez zátěže
dU	: Difference between two voltages	Rozdíl dvou napětí
BMS	: Battery management system	Systém řízení baterií

Seznam obrázků:

OBRÁZEK 1 : REAKCE ČLÁNKŮ NA PŘEBITÍ [3]	2
OBRÁZEK 2 : VLIV TEPLoty NA RI MΩ NOVÉ LIFEPO ₄ BATERIE O KAPACITĚ 20AH [4]	3
OBRÁZEK 3 : VLIV SOC [5] A POČTŮ DOKONČENÝCH CYKLŮ [6] NA HODNOTU RI	3
OBRÁZEK 4 : HORNÍ: NÁHLED NA NABÍJECÍ PROUD BATERII A NAPĚTÍ BATERIE [7] DOLNÍ: NABÍJECÍ PROFILY NAPĚTÍ LIFEPO ₄ BATERIE 16AH PŘI NABÍJENÍ PROUDEM OD C/25 AŽ 5C [5]	4
OBRÁZEK 5 : [10] ZMĚŘENÉ A SIMULOVANÉ DYNAMICKÉ JEVY NAPĚTÍ BATERIE	5
OBRÁZEK 6 : [12] VLIV NEVYVÁŽENOSTI KAPACITY A ROZDÍLY PASIVNÍHO A AKTIVNÍHO VYVAŽOVÁNÍ.....	7
OBRÁZEK 7 : ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA BATERIE S OCHRANNÝMI MOSFET SPÍNAČI	8
OBRÁZEK 8 : KOMERČNĚ DOSTUPNÉ BMS S PASIVNÍM BALANCOVÁNÍM [14]	9
OBRÁZEK 9 : KOMERČNĚ DOSTUPNÝ AKTIVNÍ BALANCÉR PRACUJÍCÍ NA REDISTRIBUČNÍM PRINCIPU [15]	10
OBRÁZEK 10 : ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA SILOVÉ ČÁSTI BALANCÉRU Z OBRÁZKU 9	10
OBRÁZEK 11 : [16] ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA SPÍNAČOVÉHO BALANCÉRU S PROSTŘEDNÍKEM REZONANČNÍHO TYPU	10
OBRÁZEK 12 : [16] TEORETICKÝ PRŮBĚH PROUDU A NAPĚTÍ NA REZONANČNÍM ČLENU BALANCÉRU A PŘÍSLUŠNÉ SPÍNACÍ KOMBINACE	11
OBRÁZEK 13 : ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA SILOVÉHO OBVODU BALANCÉRU S BLOKUJÍCÍM MĚNIČEM (FLY- BACK)	11
OBRÁZEK 14 : PROUD INDUKČNOSTÍ PŘI BUZENÍ OBDÉLNÍKOVÝM NAPĚTÍM 1 V V ZÁVISLOSTI NA ČASE VTAŽENÉM K ŘÍDÍCÍ FREKVENCÍ 20 KHZ BEZ UVAŽOVÁNÍ NASYCENÍ JÁDRA	12
OBRÁZEK 15 : ZTRÁTOVÝ ODLEHČOVACÍ OBVOD S KONDENZÁTOREM, DIODOU A REZISTOREM	13
OBRÁZEK 16 : SIMULACE VYPÍNACÍCH ZTRÁT A NAPĚŤOVÉ ŠPIČKY NA SPÍNAČI T1 BEZ ODLEHČOVACÍHO OBVODU	14
OBRÁZEK 17 : SIMULACE VYPÍNACÍCH ZTRÁT A NAPĚŤOVÉ ŠPIČKY NA SPÍNAČI T1 S ODLEHČOVACÍM OBVODEM	14
OBRÁZEK 18 : VÝSLEDKY SIMULACE VYPÍNACÍCH ZTRÁT A NAPĚŤOVÉ ŠPIČKY NA SPÍNAČI T1 BEZ ODLEHČOVACÍHO OBVODU	15
OBRÁZEK 19 : VÝSLEDKY SIMULACE VYPÍNACÍCH ZTRÁT A NAPĚŤOVÉ ŠPIČKY NA SPÍNAČI T1 S ODLEHČOVACÍM OBVODEM	16
OBRÁZEK 20 : [18] BEZEZTRÁTOVÝ ODLEHČOVACÍ OBVOD	17
OBRÁZEK 21 : TEORETICKÝ THEVENINŮV MODEL S IMPLEMENTOVANÝM ČASOVÝM MODELU BATERIE [10][22]	18
OBRÁZEK 22 : MENU PRO ZADÁVÁNÍ PARAMETRŮ TABULKOVĚ POPSANÉHO MODELU BATERIE Z MATLAB SIMULINGU	18
OBRÁZEK 23 : SIMULAČNÍ VÝSLEDKY PASIVNÍHO 4S1P BALANCÉRU	21
OBRÁZEK 24 : NAPĚTÍ CELÉ BATERIE A NAPĚTÍ JEDNOTLIVÝCH ČLÁNKŮ PŘI AKTIVNÍM BALANCOVÁNÍ ...	23
OBRÁZEK 25 : DETAIL PRŮBĚHŮ PROUDU BALANCOVACÍMI VĚTVEMI	23
OBRÁZEK 26 : BLOKOVÉ SCHÉMA NAVRHOVANÉHO ŘÍZENÍ	24
OBRÁZEK 27 : ALGORITMUS HLADINOVÉHO ŘÍZENÍ S HLÍDÁNÍM ROZDÍLU NAPĚTÍ A DVOUSTAVOVÝM VÝSTUPEM	24
OBRÁZEK 28 : ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ JEDNOTLIVÝCH NAPĚTÍ V BATERII	25
OBRÁZEK 29 : KOMPARÁTOR S HYSTEREZÍ NASTAVITELNOU POMOCÍ SOUČTOVÉHO ZESILOVAČE A DVOU REFERENČNÍCH NAPĚTÍ	26
OBRÁZEK 30 : ZAPOJENÍ PRO URČOVÁNÍ MAXIMÁLNÍHO A MINIMÁLNÍHO NAPĚTÍ A JEJICH ROZDÍLU ...	26

OBRÁZEK 31 : ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ VYHODNOCOVACÍCH ČLENU S PŘEDCHOZÍMI ČLENY	27
OBRÁZEK 32 : PŘEHLEDOVÝ SNÍMEK KOMPLETNÍHO SIMULAČNÍHO MODELU	27
OBRÁZEK 33 : SIMULAČNÍ VÝSLEDKY HLADIVÉ REGULACE S HLÍDÁNÍM DU PRO OBDÉLNÍKOVÝ PROUD S AMPLITUDOU 20 A (NAPĚTÍ A PROUDY)	28
OBRÁZEK 34 : SIMULAČNÍ VÝSLEDKY HLADIVÉ REGULACE S HLÍDÁNÍM DU PRO OBDÉLNÍKOVÝ PROUD S AMPLITUDOU 20 A (VNITŘNÍ VELIČINY)	29
OBRÁZEK 35 : SIMULAČNÍ VÝSLEDKY HLADIVÉ REGULACE S HLÍDÁNÍM DU PRO OBDÉLNÍKOVÝ PROUD S AMPLITUDOU 10 A (NAPĚTÍ A PROUDY)	30
OBRÁZEK 36 : SIMULAČNÍ VÝSLEDKY HLADIVÉ REGULACE S HLÍDÁNÍM DU PRO OBDÉLNÍKOVÝ PROUD S AMPLITUDOU 10 A (VNITŘNÍ VELIČINY)	31
OBRÁZEK 37 : SIMULAČNÍ VÝSLEDKY HLADIVÉ REGULACE S HLÍDÁNÍM DU PRO TROJÚHELNÍKOVÝ PROUD S AMPLITUDOU 18,5 A (NAPĚTÍ A PROUDY)	32
OBRÁZEK 38 : SIMULAČNÍ VÝSLEDKY HLADIVÉ REGULACE S HLÍDÁNÍM DU PRO TROJÚHELNÍKOVÝ PROUD S AMPLITUDOU 18,5 A (VNITŘNÍ VELIČINY)	33
OBRÁZEK 39 : ALGORITMUS HLADINOVÉHO ŘÍZENÍ S HLÍDÁNÍM ROZDÍLU NAPĚTÍ A VOLBOU STŘÍDY DLE PROUDU	35
OBRÁZEK 40 : PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKA Z DOKUMENTACE INTEGROVANÉHO HALLOVA SNÍMAČE PROUDU [20]	35
OBRÁZEK 41 : PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKA ČLENU ABSOLUTNÍ HODNOTY PRO ÚPRAVU SIGNÁLU ZE SNÍMAČE PROUDU	36
OBRÁZEK 42 : SIMULAČNÍ ZAPOJENÍ ČLENU ABSOLUTNÍ HODNOTY PRO ÚPRAVU SIGNÁLU SNÍMAČE PROUDU	36
OBRÁZEK 43 : INTEGRAČNÍ ČLEN PRO NESYMETRICKÉ NAPÁJENÍ	37
OBRÁZEK 44 : SOUČET REGULAČNÍ ODCHYLKY PROUDOVÉHO MĚŘENÍ A INTEGRAČNÍHO ČLENU TVOŘÍCÍ AKČNÍ VELIČINU	37
OBRÁZEK 45 : SIMULAČNÍ VÝSLEDKY REGULACE DLE PROUDU PŘI NABÍJENÍ 10 A (NAPĚTÍ A PROUD PRIMÁRNÍM VINUTÍM)	38
OBRÁZEK 46 : SIMULAČNÍ VÝSLEDKY REGULACE DLE PROUDU PŘI NABÍJENÍ 10 A (REGULAČNÍ VELIČINY)	39
OBRÁZEK 47 : SIMULAČNÍ VÝSLEDKY REGULACE DLE PROUDU PŘI VYBÍJENÍ 10 A (NAPĚTÍ A PROUD PRIMÁRNÍM VINUTÍM)	40
OBRÁZEK 48 : SIMULAČNÍ VÝSLEDKY REGULACE DLE PROUDU PŘI VYBÍJENÍ 10 A (REGULAČNÍ VELIČINY)	41

Seznam tabulek:

TABULKA 1 (ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI BATERIE)	1
TABULKA 2 (DALŠÍ VLASTNOSTI BATERIE)	1
TABULKA 3: VÝPIS HODNOT Z DOKUMENTACE CEBA1868130-3.2V10AH [9]	5

Seznam charakteristik:

CHARAKTERISTIKA 1 : $UOC = F(SOC)$ JEDNOHO 3.2 V ČLÁNKU LiFePO_4 PRO MATLABOVÝ MODEL	19
CHARAKTERISTIKA 2 : $RI = F(SOC)$ JEDNOHO 3.2 V ČLÁNKU LiFePO_4 PRO MATLABOVÝ MODEL	19

Úvod:

- **Elektrochemický článěk**

[1] Je soustava tvořena kladnou a zápornou elektrodou a vhodným iontově vodivým elektrolytem, který musí být ve styku s oběma elektrodami, jež jsou přitom prostorově odděleny. V elektrochemickém článku probíhají elektrochemické reakce, kterýchž se účastní elektrony, což vede ke vzniku elektrického proudu od jedné elektrody ke druhé.

- **Baterie**

Je soustava elektrochemických článků nebo článěk samotný, postačují-li jeho parametry. Základní parametry baterie kromě polaritý elektrod jsou následující:

Tabulka 1 (Základní vlastnosti baterie)

Název	Jednotka	Příklady
¹ Napětí	[V]	1,5 V, 3,2 V, 9 V, 12 V...
Kapacita	[mAh]	3200 mAh, 9800 mAh...
Použitý elektrolyt	[-]	LiFePO ₄ , NiMH, olověné...

Pozn.: u větších baterií se kapacita může uvádět i v [Ah] ampér hodinách

Pozn. 1: udává napětí baterie naprázdno (OCV neboli open circuit voltage)

Kromě základních parametrů lze děje a stavy související s baterií popisovat odvozenými Parametry:

Tabulka 2 (Další vlastnosti baterie)

Název	jednotka	popis
C-míra	[-]	¹ Míra proudu při nabíjení nebo vybíjení vztažená k ampér hodinové kapacitě baterie
Vnitřní odpor	[mΩ]	Jeho vlivem dochází k úbytku napětí a zahřívání baterie. Bývá ovlivněn stavem nabití, teplotou, stavem elektrod a elektrolytu, či stářím baterie
Impedance	[mΩ]	Standardně udávána jako podíl přiloženého střídavého napětí ku střídavému proudu protékáném baterií při frekvenci 1kHz
Účinnost	[%]	Vypočítává se podle vtékaného proudu při nabíjení a vydaného proudu do konce cyklu
Stav nabití	[%]	Aktuální hladina nabití odvozena od ² napětí nabité baterie nebo ³ vypočtena podle vtékaného a vytékaného proudu
Stav života	[%]	⁴ Hodnota stanovená z vnitřního odporu a užitečné nabitě kapacity

Pozn. 1: (C-rate), baterie s kapacitou 1Ah je v režimu 1C nabíjena nebo vybíjena proudem 1A, při 0,5C se baterie bude nabíjet nebo vybíjet proudem 0,5A

Pozn. 2: (SoC), nepřesná pro baterie typu LiFePO₄ vzhledem k linearitě napětíového profilu baterie

Pozn. 3: (SoC), tato metoda vyžaduje kalibraci pro určení vybitého a nabitého stavu, dále musí zohlednit vnitřní vybíjení baterie

Pozn. 4: (SOH), baterie s nízkou hodnotou se přehřívají a mají nízkou užitečnou kapacitu

- **Sérioparalelní spojování baterií**

Vhledem k zmíněným vlastnostem baterií je doporučeno spojovat pouze baterie stejného typu použitého elektrolytu a kapacity.

Takto složené baterie se poté označují např.: 2S3P. S je počet sériově řazených článků a P udává počet paralelních větví těchto sérii.

- **Paralelní řazení**

Paralelně řazené baterie budou mít vždy proti sobě stejná napětí a zdánlivě zvýšenou možnost proudového odběru, protože při zatížení takto vytvořené baterie se na vzniku proudu zátěží bude více podílet článek s menším R_i a následně budou v baterii vznikat velké vyrovnávací proudy mezi články. Tyto proudy vytvoří další ztráty na R_i mezi články. Význam tohoto jevu je pozorovatelný ze studie týmu University of Sherbrooke [2], kdy bylo zkoumáno šestnáct článků LiFePO_4 .

V nejhorším případě bude do zátěže pracovat nejlepší článek skrz své nízké R_i (pracovní ztrátový výkon) a následně jej budou horší články opět nabíjet přes své a jeho R_i (ztrátový výkon mimo výstupní svorky, jinak řečeno čistě uvnitř baterie).

Zbavení se těchto ztrát uvnitř baterie je poměrně jednoduché a využívá se i u amatérských fotovoltaických elektráren, a to vložením diody v propustném směru do každé paralelní větve. Kladná svorka baterie je poté tvořena katodami těchto diod. Nyní ovšem nelze počítat s okamžitou napěťovou vyvážeností, ovšem při provozu této baterie bude klesat napětí napěťově nejsilnějšího článku, dokud se nevyrovná se zbytkem, což vytváří rovnováhu.

Takto vytvořenou baterii je žádoucí doplnit ještě o další řadu antiparalelních diod, jejichž anody budou sloužit pro nabíjecí uzel, protože baterii jinak nelze nabíjet.

- **Sériové řazení**

Při sériově řazených člancích v baterii sice stoupá R_i s každým dalším článkem, ovšem získáme baterii s vyšším napětím, a tedy pro stejný výkon lze odebírat nižší proud, což vede ke snížení ztrát na R_i pro požadovaný výkon.

Odebíraný proud zátěže je pro všechny články série stejný, čímž odpadá vliv různých R_i a všechny články jsou vybíjeny stejně.

Nicméně, pokud nejsou články úplně nové a při jejich výrobě nebyly nastaveny přísné podmínky a minimální tolerance, lze říct, že i když se články jeví stejné, mají rozdílnou užitečnou kapacitu. Zde je nutno pochopit, jak se stav nabití (SoC) projeví na napětí článku a že ve zdánlivě plně nabitě baterii složené ze sériově řazených článků se může vyskytovat jeden hluboce podbitý nebo příliš nabitý článek.



Obrázek 1 : Reakce článků na přebíjení [3]

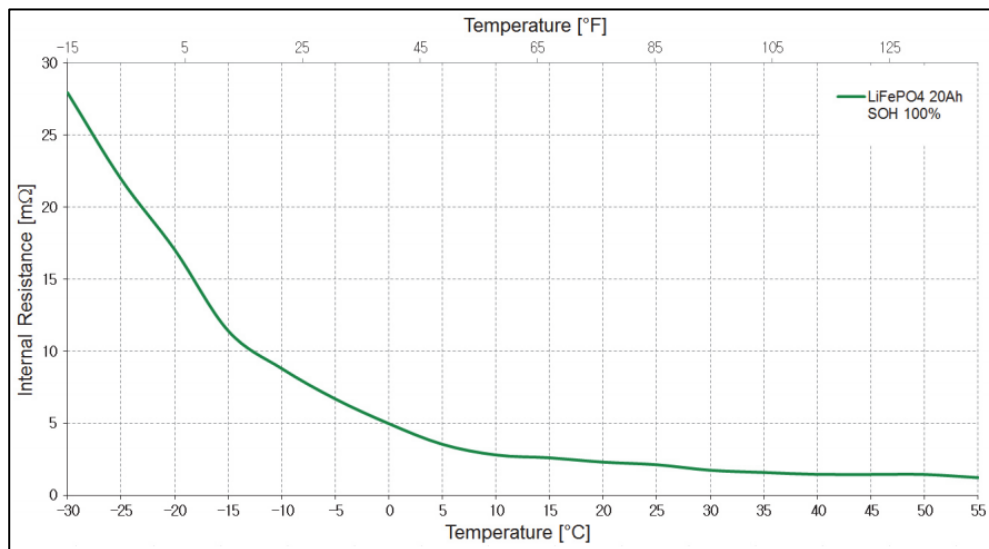
1. Elektrické parametry článku

1.1. sériový odpor R_i [$m\Omega$]

Jak již bylo řečeno, hodnota tohoto parametru velice ovlivňuje chování baterie, a to hlavně její účinnost a výstupní napětí, které je sníženo průchodem proudu přes R_i baterie.

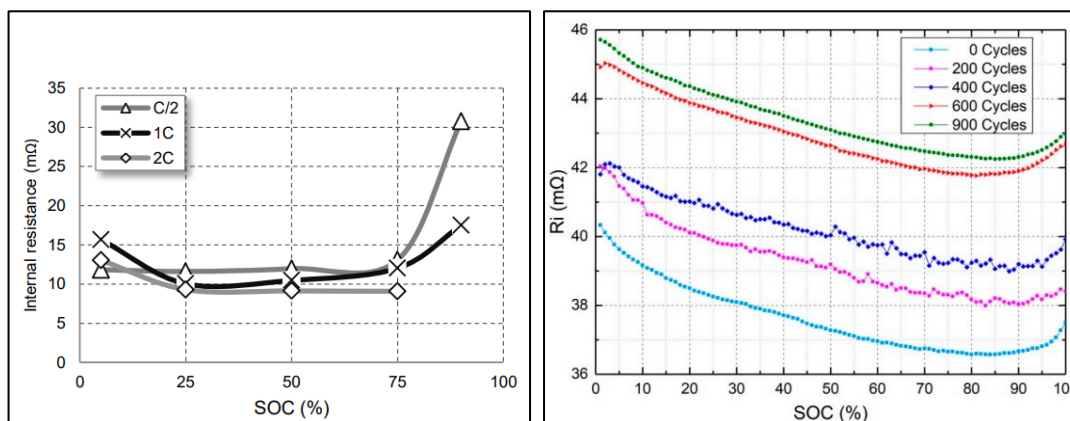
- **Závislosti vnitřního odporu R_i [$m\Omega$]**

Závislost R_i na teplotě zaznamenal Pán Andrzej Łebkowski ve své studii [4]. Lze si snadno všimnout že R_i článků LiFePO_4 začíná stoupat pro teploty nižší než 10°C a při teplotě -25°C je již více než 10x větší.



Obrázek 2 : vliv teploty na R_i $m\Omega$ nové LiFePO_4 baterie o kapacitě 20Ah [4]

Další znatelná změna R_i je pozorovatelná při změně stavu nabití (SoC), kde tým z University of Oviedo [5] prováděl měření při nabíjení baterie typu LiFePO_4 s kapacitou 16 Ah. Hodnoty R_i určoval v režimu CC ze dvou naměřených nabíjecích charakteristik podílem změny napětí a proudu v daném bodě SOC. R_i lze určovat přímo pomocí U_{oc} , hodnotu odebíraného proudu a poklesu napětí při odebíraném proudu.



Obrázek 3 : vliv SoC [5] a počtu dokončených cyklů [6] na hodnotu R_i

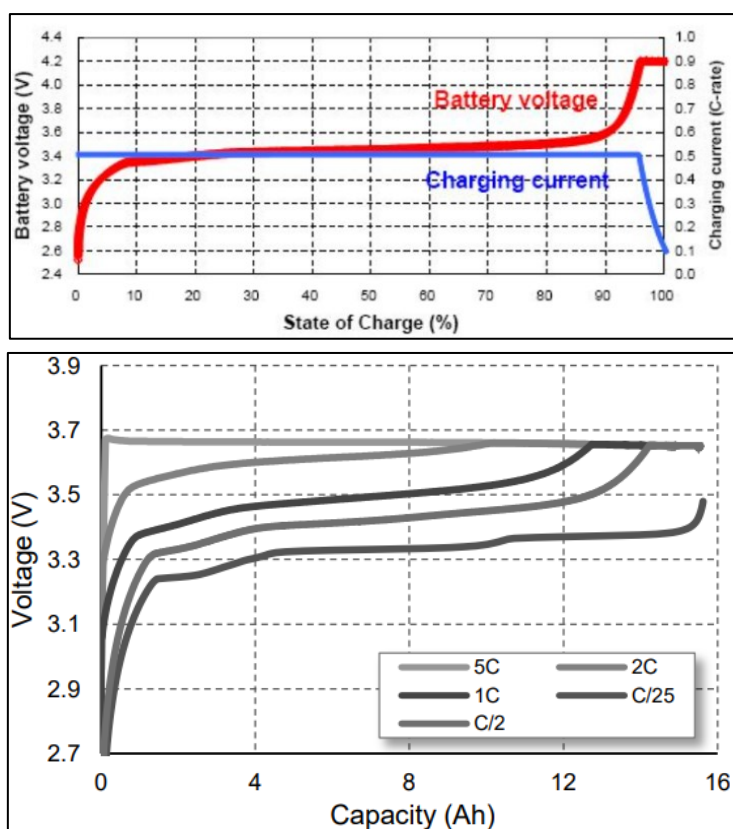
Další měřitelný vliv na R_i má stárnutí baterie, ovšem v tomto případě by R_i mohlo být spíše naopak indikátorem stáří baterie. Z výsledků studie týmu z Donghua University [6] lze pozorovat změnu R_i přibližně 6 m Ω po devíti stech cyklech.

1.2. Napětí

Při práci baterie LiFePO_4 není napětí na svorkách moc informačně hodnotné, protože se v oblasti 20-80 % SoC jeví konstantní, dle [7] činí rozdíl napětí v těchto bodech 0.1 V. Z napětí lze pouze usoudit, je-li baterie plně nabitá, neurčitě nabitá nebo téměř vybitá. Napěťový profil LiFePO_4 se takto rozdělí do tří oblastí, které lze dobře sledovat při nabíjení baterie.

- **Nabíjení**

Standardní nabíjení LiFePO_4 článků začíná v režimu (CC/constant current) konstantní proud, a to hodnotou proudu označovanou v *C-rate*, která je vztažena ke kapacitě baterie, dokud napětí na baterii nedosáhne limitního napětí. Následuje (CV/constant voltage) konstantní napětí, kdy proud klesá až do předepsané hodnoty. Proces nabíjení může trvat přibližně 3 hodiny do plného nabití jednoho článku. Ze studie týmu University of Oviedo [5] lze pozorovat, že okamžitý stav nabití SoC opravdu nelze určovat z napětí a obzvláště ne při velkých nabíjecích proudech. Opačný účinek na napětí mají i velké vybíjecí proudy (úbytek na R_i) [9].



Obrázek 4 :

horní: náhled na nabíjecí proud baterii a napětí baterie [7]

dolní: nabíjecí profily napětí LiFePO_4 baterie 16Ah při nabíjení proudem od C/25 až 5C [5]

O dalších možných způsobech nabíjení se lze dočíst v článku [8] kde je zmíněno také rychlé nabíjení Lithium iontových článků.

Nabíjení LiFePO_4 baterie je tedy vhodné realizovat s ohledem na hodnoty z dokumentace baterie nebo článku. Pro jeden článek dle dokumentace [9] je například uvedeno:

Tabulka 3: Výpis hodnot z dokumentace CEBA1868130-3.2V10AH [9]

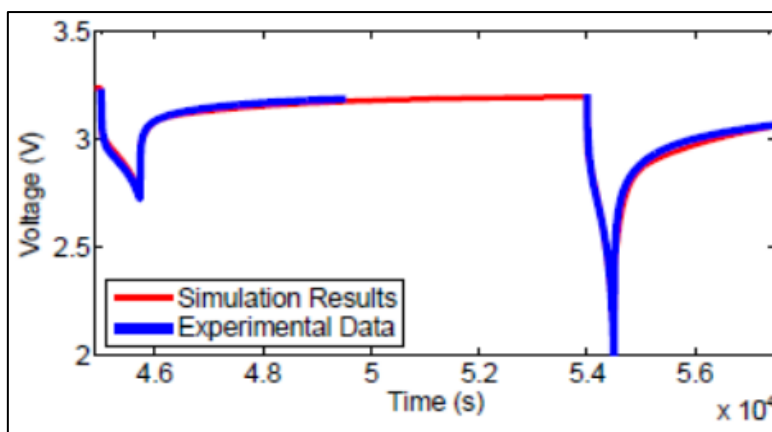
Článek: CEBA1868130-3.2V10AH		
Nominální kapacita	10 Ah @ 0.2C	Výrobce změřená kapacita článku
Nominální napětí	3.2 V	Typické napětí článku při 1C provozu
Napětí při nabití (proud na konci nabíjení)	3.65 V (0.05C)	Napětí a proud konce nabíjecího cyklu
Napětí při vybití	2.5 V	Napětí na konci vybíjecího cyklu

Dále jsou výrobcem uvedeny maximální nabíjecí a vybíjecí proudy s teplotními intervaly, vnitřní odpor, rozměry článku a další závislosti, které mají vliv na činnost článku.

- **Dynamické děje způsobené RC členy**

Z výsledků studie týmu Universiti Teknologi Malaysia [10], který velice přesně dokázal vytvořit model baterie LiFePO_4 s kapacitou 18 Ah a ověřil jej simulačně, lze pozorovat, že při pulzním odběru zátěže dochází k zvlnění napětí baterie. Toto zvlnění napětí modelují pomocí dvou RC členů podobně jako u tzv.: Theveninova modelu [22].

Toho jevu by se s výhodou dalo využít pro zlepšení účinnosti baterie, kdy tyto kapacity RC členů přemostují část odporu R_i který tvoří ztráty a úbytek napětí při provozu baterie.



Obrázek 5 : [10] Změřené a simulované dynamické jevy napětí baterie

1.3 Kapacita

Hlavní a nejměrodatnější hodnota charakterizující baterii je její kapacita v Ah. Díky této hodnotě lze určit, jak dlouho budeme schopni tuto baterii provozovat a je velice žádoucí znát její aktuální a maximální hodnotu na každém článku v jakkoliv řazených bateriích a právě z těchto hodnot lze následně přesně určit SoC (1).

Jednou z metod zjišťování kapacity je počítání Coulombů [11], což se provádí dle rovnice (2) integrací proudu procházejícího baterií v čase. Touto metodou lze při nabíjení a pozorováním dějů vznikajících na napětí určit maximální kapacitu baterie nebo při šetrnějším provozu, kdy není plně využita kapacita baterie, určit konec nabíjení.

SoC v každém časovém okamžiku lze poté určit hodnotou odčerpaného náboje ku celkovému načerpanému náboji (1) po nabíjení. Pro rychlejší orientační určení se hodnota SoC násobí stovkou a uvádí v procentech.

$$SoC_{(t)} = \frac{Q_{(t)}}{Q_n} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

$$Q = \int_0^t i_{(t)} dt \quad [C] \quad (2)$$

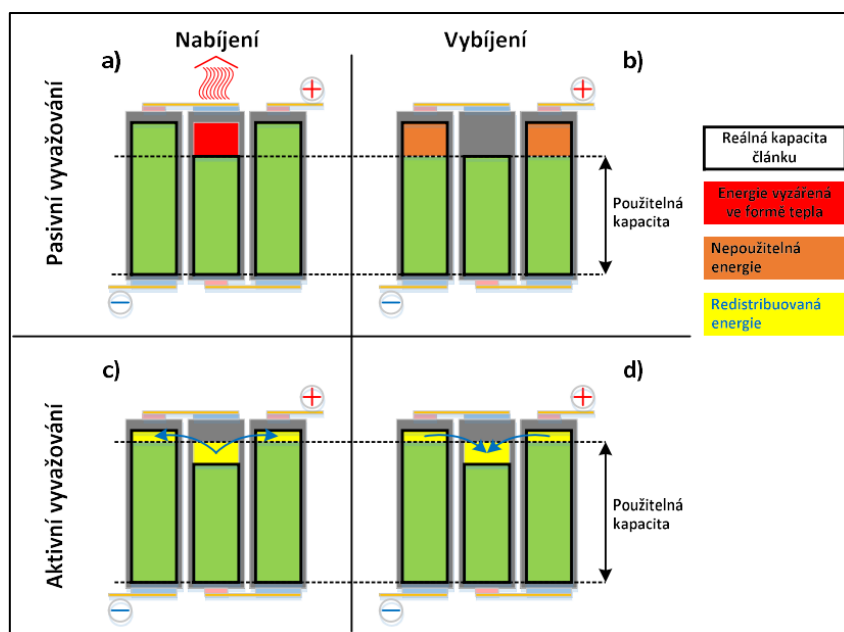
Z předchozích kapitol si lze všimnout, že zmiňované parametry byly vztahovány právě k SoC. Je tedy zřejmé, že při vytváření simulačních modelů baterie či článku se budou tyto parametry vztahovat právě k SoC.

Další nemilou vlastností kapacity baterie je její snižování vlivem stárnutí. Z dokumentace [9] lze snadno vyčíst nepřímou úměru, a to tu, že čím více cyklů má baterie odslouženo, tím je kapacita menší. Této skutečnosti se lze dočíst i z webového zdroje [13], nicméně uvádí i další skutečnost, že při užším využití kapacity např. jen 70% z celé kapacity, lze baterii použít pro 2 000 cyklů oproti 100% využití kapacity kdy baterie vydrží 500 cyklů.

2. Balancování a ochrana skládaných baterií

Jak již bylo zmíněno v úvodu, řazením článků stejného typu získáváme baterii s vyšším napětím a kapacitu vzhledem k výkonu, nicméně články mohou být různě staré a jejich kapacita se může lišit a tím znehodnocovat kvalitu celé baterie.

V takové baterii poté dochází k tomu, že jeden článek vybije svou Ah kapacitu dříve než ostatní a odstaví celou baterii z provozu. Naopak, kdyby se při nekontrolovaném nabíjení vyskytl jeden článek s plnou hodnotou nabití dříve, než ostatní v jedné baterii, mohlo by při dalším nabíjení této baterie dojít k poškození tohoto článku nebo i v případě Li-POL baterie k požáru [3].



Obrázek 6 : [12] vliv nevyváženosti kapacity a rozdíly pasivního a aktivního vyvažování

Aby se tomuto předešlo, je vhodné zařízení pracující s baterií nebo i samotným článkem doplnit systémy ochrany baterie.

Pro maximalizaci kvality provozu baterie je vhodné baterii doplnit o měření kapacit a balancovací prvky.

2.1. Ochranná kritéria článků

Největším rizikem, kterým baterie ohrožuje své okolí, je **nebezpečí vzniku požáru**. Dle upozornění z dokumentace [9] na stránce osm by se mohly vznítit vybité články, články v příliš horkém prostředí nebo i zkratem na svorkách článku. Zkrat by mohl vést k požáru baterie i zkratové poruchy.

Při přebíjení vznikají uvnitř baterie tlaky, jejichž hodnoty mohou dosáhnout až 1 000 kPa [13], plyn poté začne unikat přes ochranné přetlakové ventily dle upozornění výrobců i s plameny, nebo se může stát např.: u baterie typu 18650, že se **vrchní část oddělí** od baterie a bezprostředně ohrozí okolí.

Pokud už k požáru baterie dojde, je nejvhodnější **nechat jí kontrolovaně dohořet** na zabezpečeném a větraném místě.

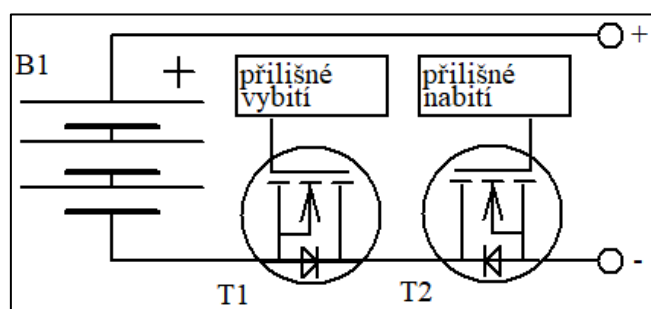
2.2. Známé topologie ochranných a vyvažovacích obvodů

Pro nejrychlejší pochopení funkcí ochrany je vhodné zaměřit se na ochranu jednoho článku a pro vyvažovací obvody je důležitá prvková náročnost.

2.2.1. Ochranné obvody

Veškerá zařízení pracující s neodnímatelnou nebo odnímatelnou baterií nebo s konektorem, skrze který lze baterii nabíjet, musí být vybaveny např.: elektronickými spínači, které zastaví vybíjení či nabíjení při dosažení hodnot napětí baterie, které znamenají přílišné vybití nebo přílišné nabití.

Dále tyto obvody hlídají odebíraný proud, např.: obvod DW01-P vypne vybíjecí MOSFET T1 a chrání tím baterii proti zkratu či nadproudu.



Obrázek 7 : Zjednodušené schéma baterie s ochrannými MOSFET spínači

Pro volbu T1 a T2 je důležitá nízká hodnota R_{dson} , protože právě při práci takto chráněné baterie vznikají ztráty přímo úměrné dvou R_{dson} , R_i a kvadrátu proudu. Dále nízké U_{sd} z parametrů parazitní diody ze struktury MOSFET, na niž vznikají ztráty při návratu ze zablokování provozního stavu.

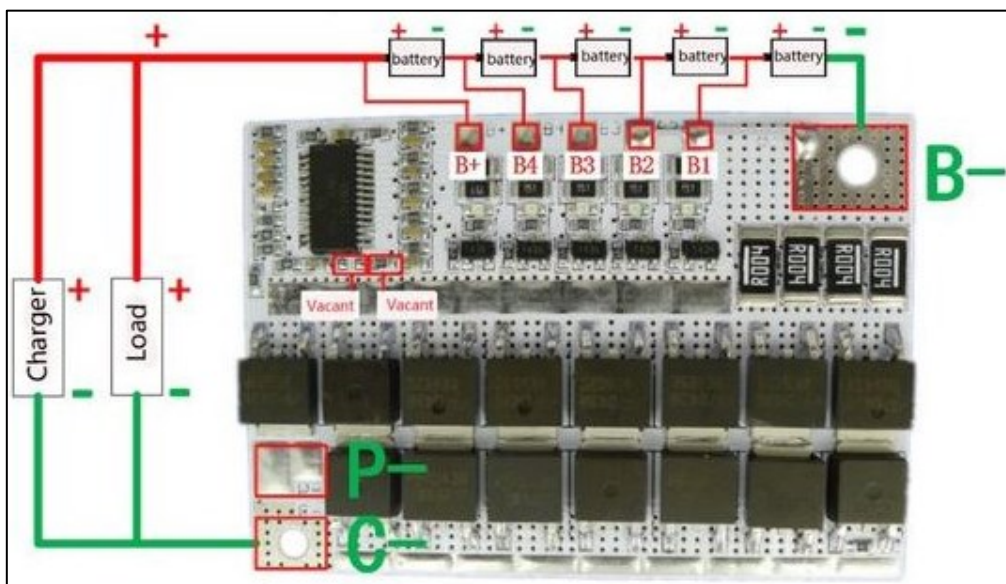
Vybíjení tedy probíhá přes parazitní diodu nebo sepnutý T2 a sepnutý T1, dokud vyhodnocovací logika tento tranzistor T1 nezavře. Tohoto lze snadno docílit připojením alespoň dva a půl krát většího napětí než U_{th} na gate T1 pro zapnutí a nulové úrovně pro vypnutí.

Nabíjení probíhá skrz parazitní diodu nebo sepnutý T1 a sepnutý T2 až do chvíle vyhodnocení nabití a vypnutí tranzistoru T2. Zde je třeba si uvědomit, že vnitřní napětí baterie působí proti napětí nabíječky a v nevodivém stavu bude na source T2 rozdíl těchto napětí ($U_s = U_B - U_{nab}$, $U_{nab} > U_B$). T2 je tedy při nulové hodnotě na gate sepnutý ($U_g = 0$, $U_{gs} > 0$) a je nutné na gate vytvořit dostatečně záporné napětí tak, aby rozdíl napětí U_{gs} bylo alespoň dva a půl krát menší než U_{th} .

T1 lze navíc použít jako nadproudovou ochranu, kdy v případě DW01-P dochází k měření napětí na MOSFET spínačích, které roste s velikostí odebíraného proudu. Při naměření kritické hodnoty napětí dochází k vypnutí T1. Pro větší rozvodnou síť je vhodné použít tavné pojistky, např.: rozvody v automobilech.

2.2.2. Vyvažovací topologie pasivní (ztrátové)

Pasivní balancování patří vzhledem ke své jednoduchosti k nejrozšířenější topologii a hotové a osazené DPS o velikosti občasného průkazu pro vyvažování např.: baterie 5S1P si lze snadno zakoupit, navíc s funkcemi ochrany proti zkratu, přílišnému vybití a řízením nabíjení.



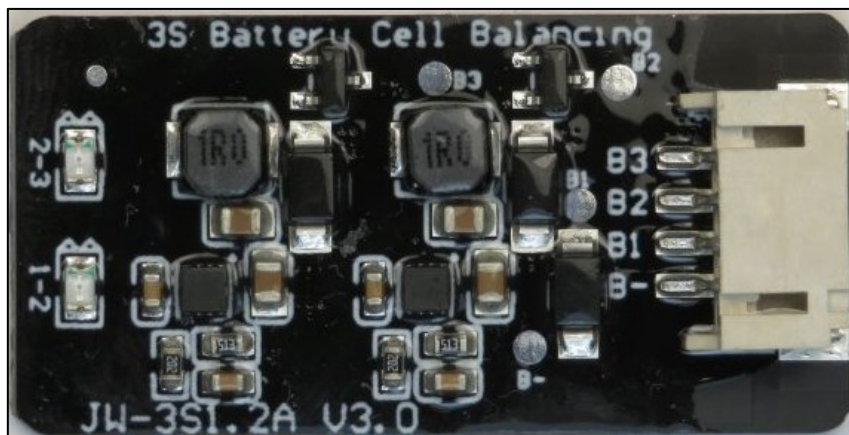
Obrázek 8 : Komerčně dostupné BMS s pasivním balancováním [14]

Principem pasivního balancování je přemostění napětově silnějších článků odporem nebo spínačem tak, aby nabíjecí proud protékal přemostěním namísto plně nabitého článku. Jinak řečeno, při nabíjení, bude-li v baterii kapacitně slabší článek, tak se nabije jako první a bude přemostěn pro další nabíjení ostatních silnějších článků. Bude-li jeden článek vybitý méně než ostatní, tak se při nabíjení nabije rychleji, bude přemostěn a zbytek článků se následně dobije.

Takto vytvořená baterie je bohužel pouze tak kvalitní jako nejméně kvalitní článek v sérii. Tento nejslabší článek bude trpět plnými cykly a dále stárnout mnohem větším tempem než zbytek baterie, který bude naopak při nabíjení přemostčován a nabíjecí výkon bude mařen na přemostění, protože se za vybijací cyklus vybil jen z části viz. obrázek 23.

2.2.3. Vyvažovací topologie aktivní se spínači (redistribuční z článku do článku)

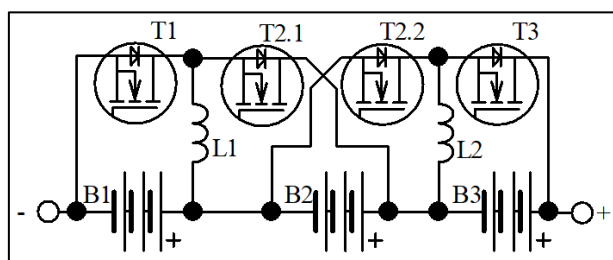
Tyto topologie jsou mnohem sofistikovanější než předchozí zmíněná a funguje přesně, jak je nadepsáno v nadpisu, kdy je přes tzv. prostředníka a matici spínačů přenášena energie z článku do článku.



Obrázek 9 : Komerčně dostupný aktivní balancér pracující na redistribučním principu [15]

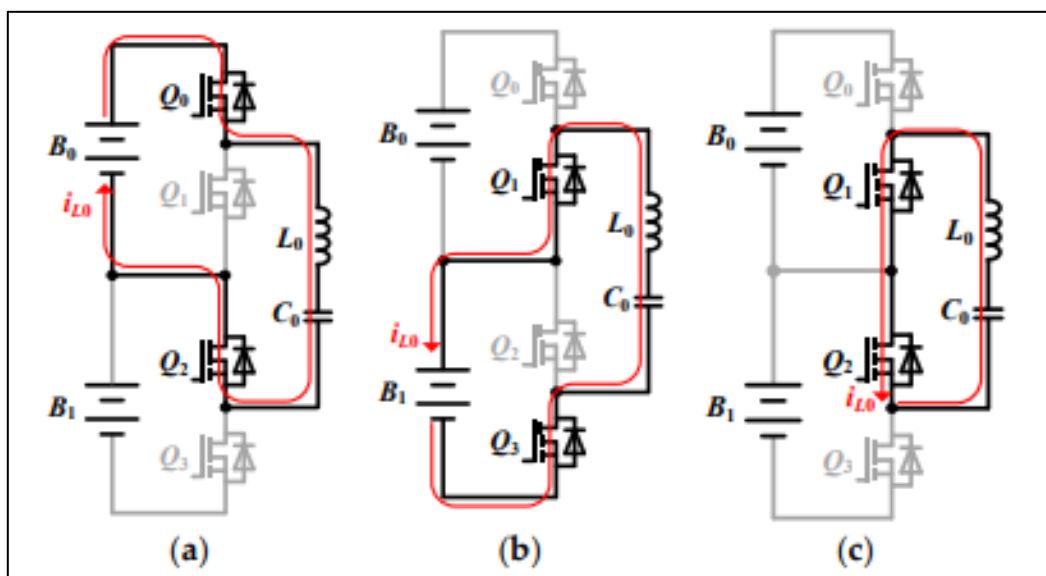
Konkrétně obvod z obrázku 9 [15] ve své silové části využívá blokující měnič, který uloží energii z jednoho článku v indukčnosti a posléze je proud komutován diodu na vedlejší článek.

Z obrázku 9 [15] dále vyplývá, že tento balancér osazen dvěma integrovanými obvody ETA3000, který je navržen právě pro tyto účely.



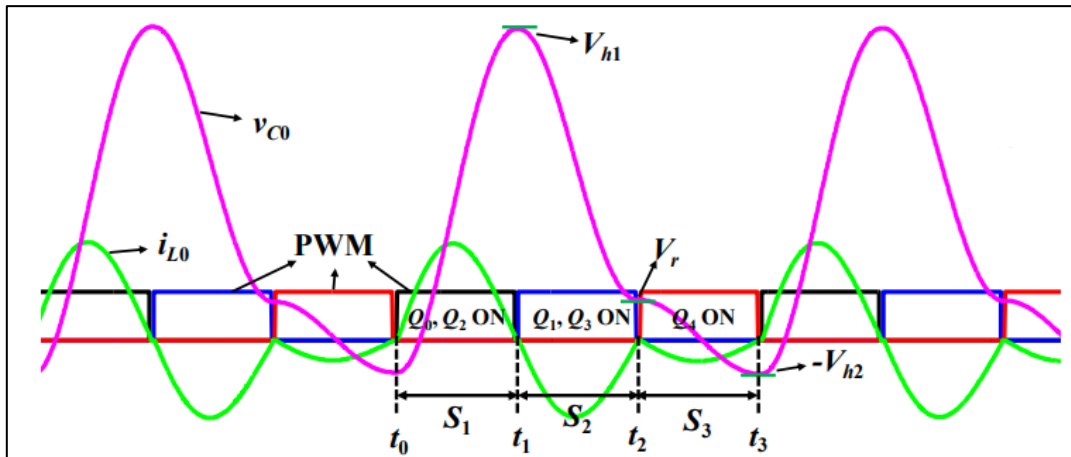
Obrázek 10 : Zjednodušené schéma silové části balancéru z obrázku 9

Ze studie [16] týmu z univerzity Shandong se lze poučit o velice podobném balancéru pracujícím s půlmůstkem pro každý článek a s režimem rezonančního spínání.



Obrázek 11 : [16] Zjednodušené schéma spínačového balancéru s prostředníkem rezonančního typu

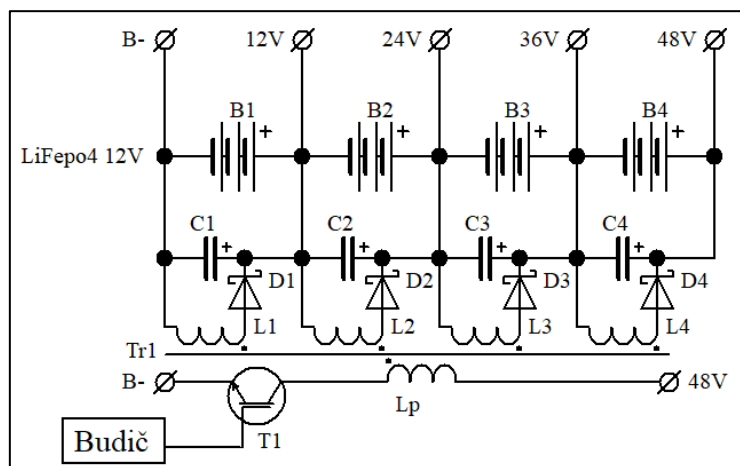
Výsledný obvod toho týmu byl řízen PWM nebo detekcí nulového proudu protékajícího rezonančním obvodem a při stavu S1 platící pro (a) se rezonanční obvod nabíjí z prvního článku, při nule proudu následuje změna stavu na S2 odpovídajícímu (b), což je vybíjení rezonančního obvodu do druhého článku.



Obrázek 12 : [16] Teoretický průběh proudu a napětí na rezonančním členu balancéru a příslušné spínací kombinace

2.2.3. Vyvažovací topologie aktivní s transformátory (fly-back)

Druhou širší skupinou balancovacích topologií jsou obvody s magneticky vázanými prvky. Vzhledem k povaze zadání této práce bude probírán pouze balancér typu fly-back s jedním spínačem pro buzení primárního vinutí blokujícího transformátoru s převodem jedna ku počtu článků v sérii.



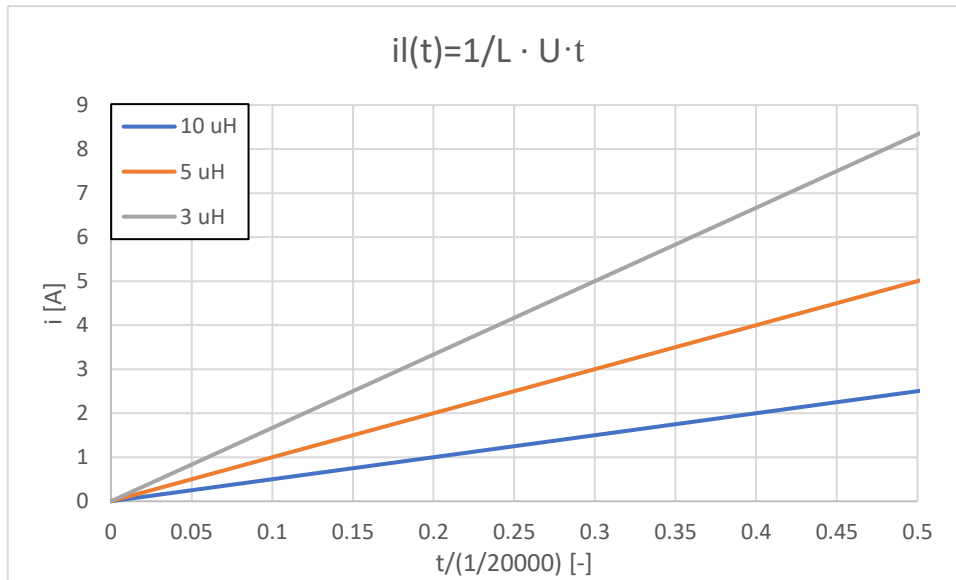
Obrázek 13 : Zjednodušené schéma silového obvodu balancéru s blokujícím měničem (fly-back)

Princip činnosti spočívá v nabuzení magnetického obvodu transformátoru Tr1 jeho primárním vinutím L_p a následným přenosem energie na sekundární stranu, kde se odebraná energie opře do napětově nejslabšího článku.

Indukčnosti jednotlivých vinutí a počet závitů pro transformátor Tr1 je nutno přesně stanovit a při výrobě toho transformátoru dbát na symetrii všech sekundárních vinutí, protože právě ta transformují parametry ze sekundární strany. Požadovanou indukčnost

primárního vinutí pro PWM řízení lze určit následujícím vztahem (3), kde U_{BAT+} je napětí baterie, d_{max} maximální dovolená střída pro buzení, f_{PWM} frekvence řídící PWM a I_{Lpmax} je požadovaný maximální vstupní vyvažovací proud.

$$L_p = U_{BAT+} \cdot \frac{d_{max} \cdot \frac{1}{f_{PWM}}}{I_{Lpmax}} \quad (3)$$



Obrázek 14 : Proud indukčnosti při buzení obdélníkovým napětím 1 V v závislosti na čase vtaženém k řídící frekvenci 20 kHz bez uvažování nasycení jádra

Dalším kritickým parametrem transformátoru Tr1 je maximální dosažitelná magnetická indukce B_{max} , která je dána výběrem materiálu jádra. Vzniklou magnetickou indukcí v jádře transformátoru pak lze určit vztahem (4) nebo (5) [17], kde B je okamžitá magnetická indukce v jádře, L je indukčnost buzeného vinutí, i okamžitý proud, N počet závitů vinutí, A_e aktivní plocha jádra a $(U \cdot t)$ je napětí a čas při buzení obdélníkovým napětím o amplitudě U po čas t .

$$B = \frac{(L \cdot i)}{(N \cdot A_e)} \quad (4)$$

$$B = \frac{\left(\frac{U \cdot t}{N}\right)}{A_e} \quad (5)$$

Návrh transformátoru Tr1 je vhodné realizovat s ohledem na aktuální dostupnost jader, kdy po výběru jádra s danou B_{max} a vnitřní permeabilitou μ_i se určí aktivní plocha jádra A_e a l_e , což je délka magnetického obvodu, které potřebujeme pro určení R_m (6). R_m (6) je magnetický odpor, kterým posléze určíme počet závitů primárního vinutí (7). Sekundární

vinutí budou s převodem jedna ku počtu článků v sérii. V případě skládání magnetického obvodu např.: z kostiček je vhodné doplnit výpočet R_m členem pro mezeru v magnetickém obvodu. Délka mezery se značí δ .

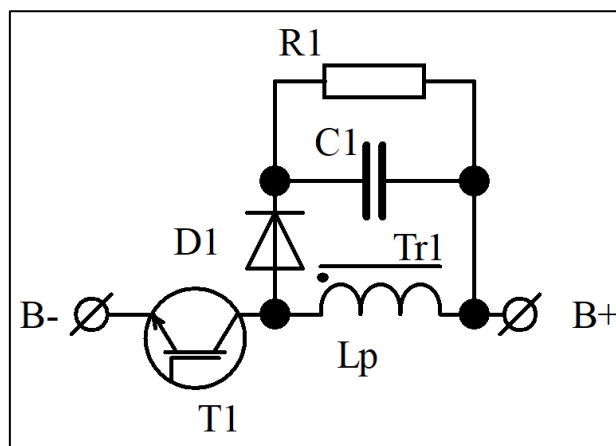
$$R_m = \frac{l_e}{(\mu_0 \cdot \mu_i \cdot A_e)} + \frac{\delta}{(\mu_0 \cdot A_e)} \quad (6)$$

$$N = \sqrt{\frac{L}{R_m}} \quad (7)$$

Výhodou této topologie je, že obsahuje pouze jeden spínač T1, nicméně tento spínač bude pracovat s maximálním požadovaným proudem a napětím celé baterie. Vzhledem ke spínání za předpokladu úplného odbuzení Tr1 bude docházet k měkkému zapínání, nicméně při vypnutí zůstane v rozptylové indukčnosti L_δ uložená energie (8). Tato rozptylová indukčnost Tr1 je snadno měřitelná a vzniká na ní při vypnutí nebezpečná napěťová špička, která ohrožuje spínač T1.

$$E_L = \frac{1}{2} \cdot L_\delta \cdot i^2 \quad (8)$$

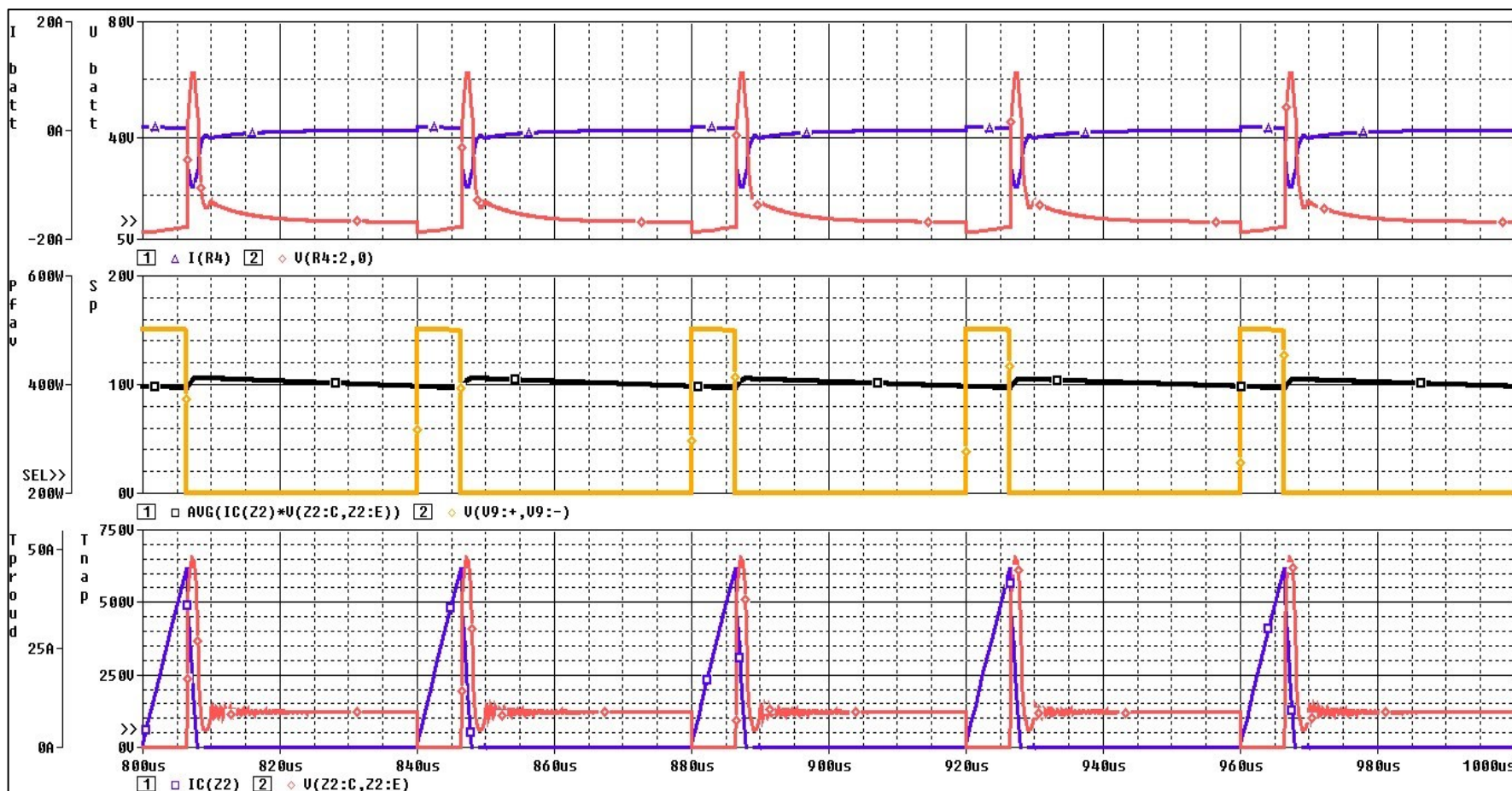
Pro ochranu spínače T1 je nutno přidat odlehčující obvod, který bude tuto energii přebírat a mařit (ztrátové), či ukládat a přenášet při další sepnutí (bezeztrátové).



Obrázek 15 : Ztrátový odlehčovací obvod s kondenzátorem, diodou a rezistorem

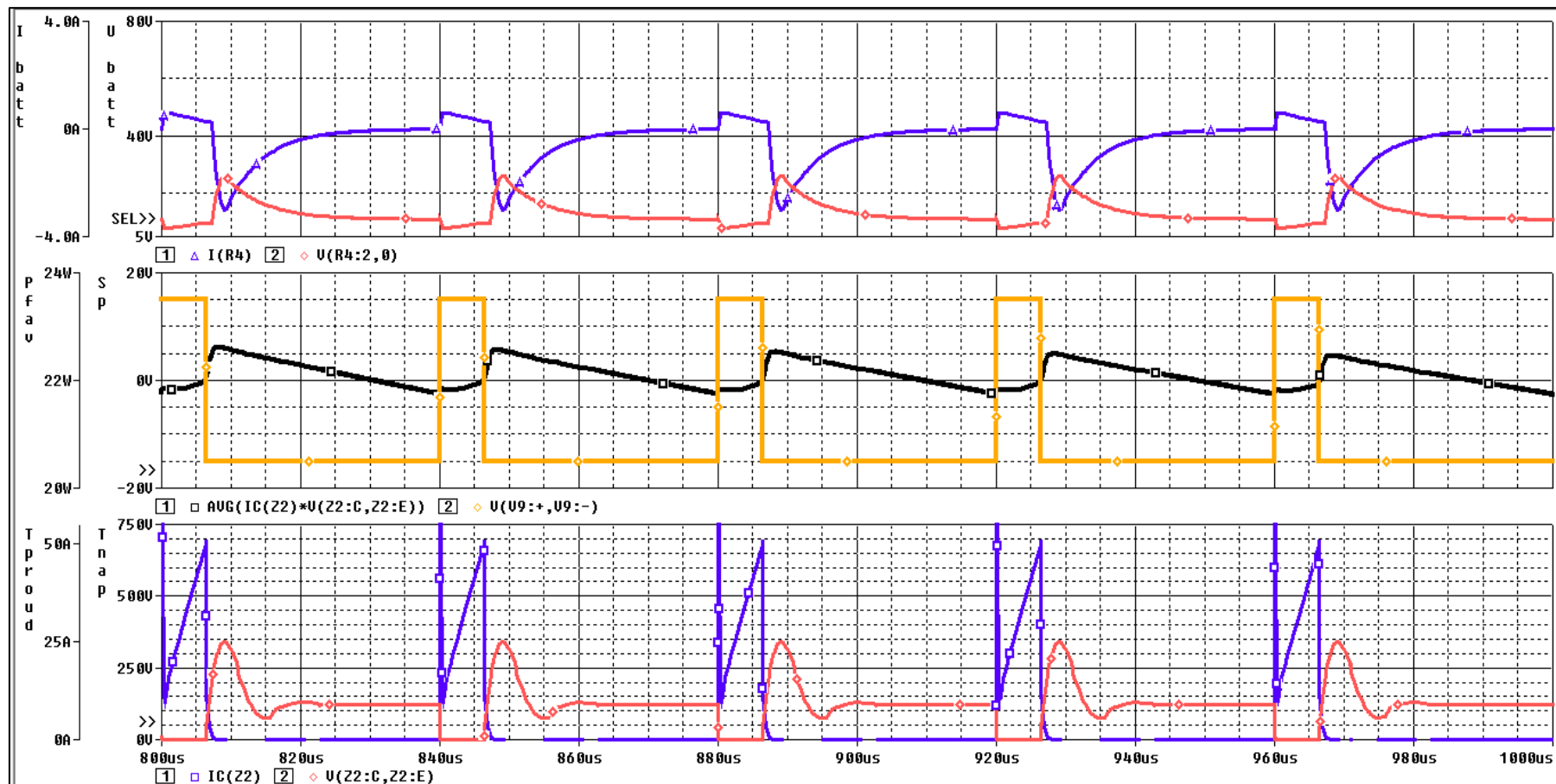
Pro demonstraci vlivu těchto napěťových špiček a ztrát byla provedena simulace jedné sekundární větve Tr1 a budícího vinutí, což v podstatě odpovídá situaci, kdy balancér bude nabíjet z celé série právě jeden nejslabší článek.

- 1.) Napětí (červeně) a proud (modře) na sekundární straně transformátoru neboli na baterii V10
- 2.) Výkonové ztráty T_1 (černě) a ovládací napětí (oranžově)
- 3.) Napětí (červeně) a proud (modře) na primární straně transformátoru



Obrázek 18 : Výsledky simulace vypínacích ztrát a napětové špičky na spínači T_1 bez odlehčovacího obvodu

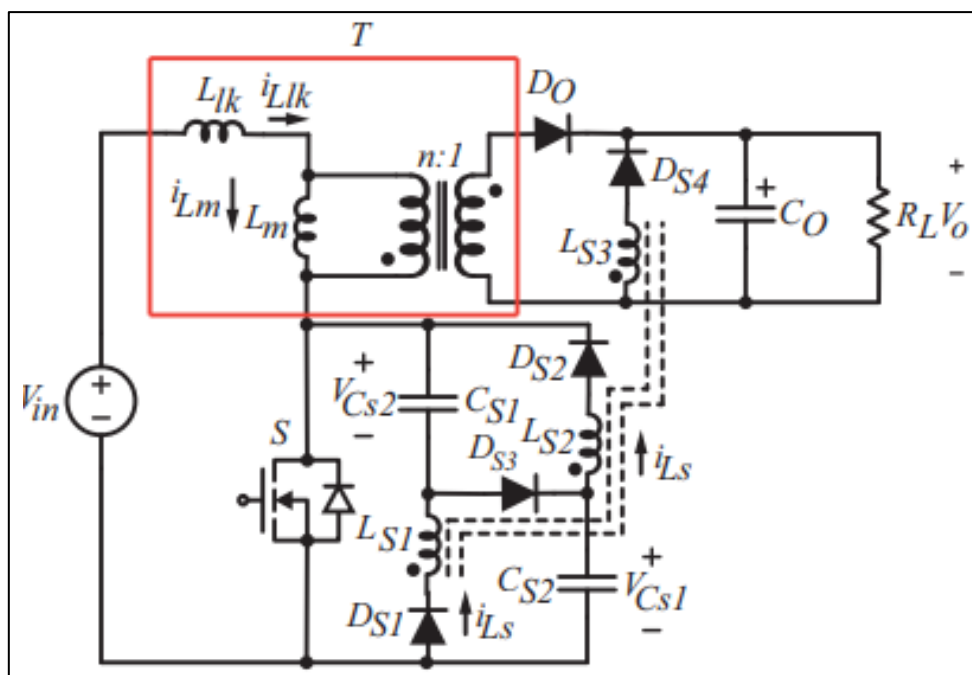
- 1.) Napětí (červeně) a proud (modře) na sekundární straně transformátoru neboli na baterii V10
- 2.) Výkonové ztráty T_1 (černě) a ovládací napětí (oranžově)
- 3.) Napětí (červeně) a proud (modře) na primární straně transformátoru



Obrázek 19 : Výsledky simulace vypínacích ztrát a napětové špičky na spínači T_1 s odlehčovacím obvodem

Ze simulačních výsledků vyplývá, že napětové namáhání při vypínání spínače T1 bylo značně sníženo. Spínač je tedy úspěšně ochráněn odlehčovacím obvodem.

V článku Pánů Mehdi Mohammadiho a Martin Ordoneze [18] lze nastudovat bezetrátový typ odlehčovacího obvodu, který energii ukládá do kondenzátorů paralelně připojených ke spínači. Společně s kondenzátory je zde připojen ještě transformátor a diody, které slouží k přenosu uložené energie na sekundární stranu ve chvíli sepnutí spínače S.



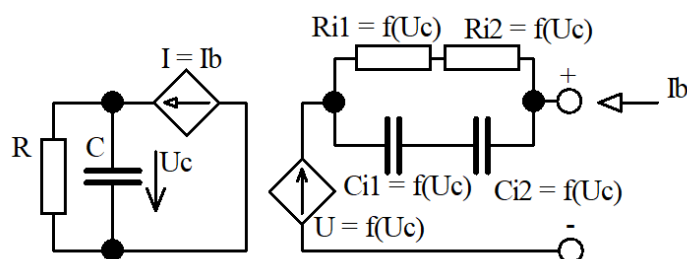
Obrázek 20 : [18] Bezeztrátový odlehčovací obvod

3. Simulační analýza baterie 4S1P a balancovacích systémů

Jako simulační prostředí byl zvolen MATLAB R2020a simuling, který ve své knihovně Simscape poskytuje potřebné prvky a modely pro analýzu.

3.1. Teoretický model baterie

Nejčastějším a nejjednodušším způsobem modelování baterie v elektrotechnických simulacích je proudem řízený zdroj proudu, který napájí kondenzátor C [19]. Z napětí tohoto kondenzátoru se poté určují pomocí tabulek charakteristické veličiny jako svorkové napětí U_{oc} a vnitřní odpor R_i . Pokročilejší modely mohou obsahovat kondenzátory C_i nebo R představující vnitřní vybíjení baterie, které je u LiFePo_4 baterií zanedbatelné. C_i paralelně k vnitřnímu odporu slouží pro simulaci dynamických jevů, jako je pomalý pokles svorkového napětí po konci nabíjení nebo při rychlých změnách zatížení [10][22].



Obrázek 21 : Teoretický Theveninův model s implementovaným časovým modelem baterie [10][22]

3.2. Použitý model baterie

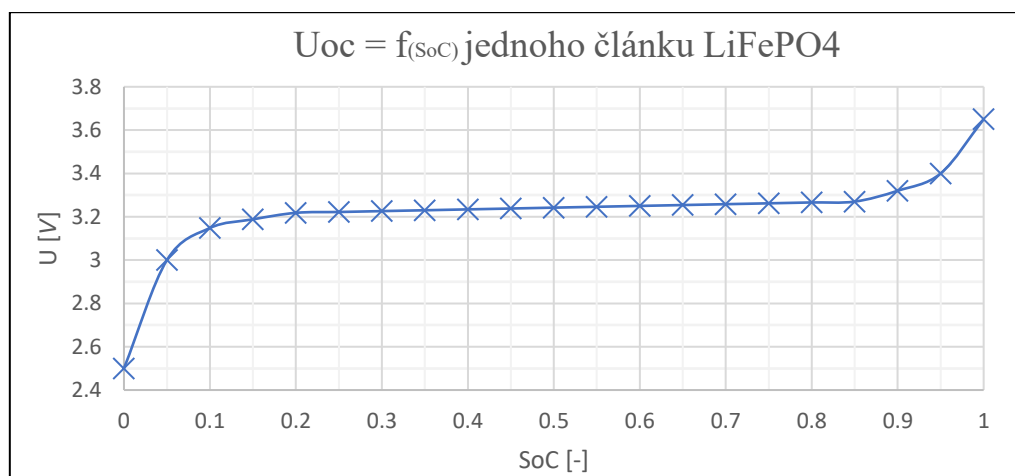
Z knihovny Simscape byl využit tabulkově popsáný model baterie, do něž je třeba zadat vztahné body SoC a jim náležící hodnoty napětí otevřené smyčky U_{oc} a vnitřního odporu R_i . Další důležitou hodnotou je ampér hodinová kapacita.

Zjednodušující předpoklady, které byly pro analýzu baterie přijaty, jsou konstantní teplota a zanedbání dynamických jevů.

Battery (Table-Based)	
This block models a battery based on tabulated characteristics as functions of state of charge (SOC) and optional temperature (T).	
Settings	
<div> Main Dynamics Fade Variables </div>	
Vector of state-of-charge values, SOC:	[0.2,0.25,0.3,0.35,0.4,0.45,0.5,0.55,0.6,0.65,0.7,0.75,0.8,0.85,0.9,0.95,1]
Temperature dependent tables:	No - do not tabulate parameters over temperature
No-load voltage, $V_0(\text{SOC})$:	[1.688,11.72,11.752,11.784,11.816,12.2,13,14.6] V
Terminal resistance, $R_0(\text{SOC})$:	[0.04,0.04,0.04,0.048,0.06,0.08,0.12,0.156,0.24] Ohm
Ampere-hour rating, AH:	0.004 hr*A
Self-discharge:	Disabled
Extrapolation method for all tables:	Nearest

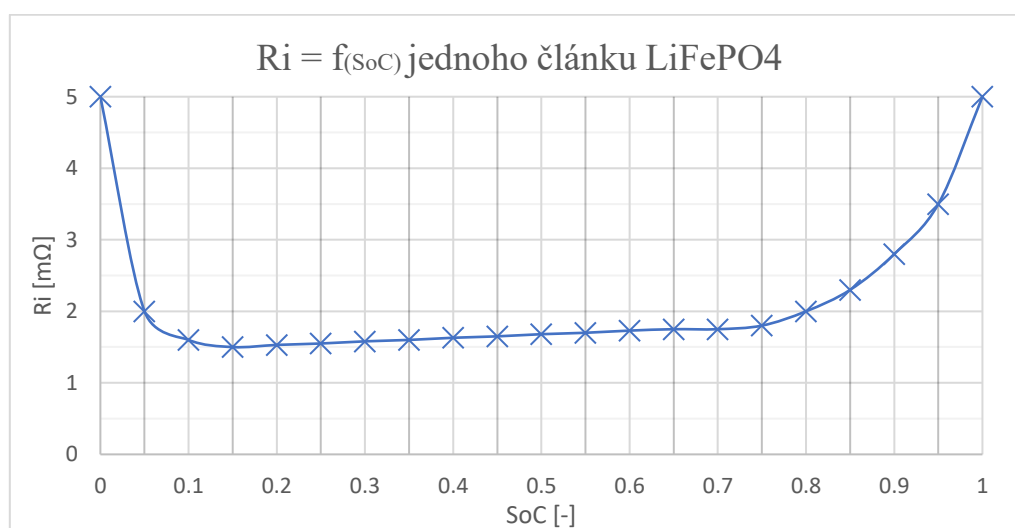
Obrázek 22 : Menu pro zadávání parametrů tabulkově popsáného modelu baterie z MATLAB simulingu

Z informací získaných ze studie [5], webového zdroje [7] a z dokumentace [9] byla vytvořena následující závislost napětí na stavu nabití jednoho článku.



Charakteristika 1 : $U_{oc} = f(\text{SoC})$ jednoho 3.2 V článku LiFePO_4 pro MATLABový model

Dále ze studie [5] byl převzat tvar charakteristiky R_i pro 100Ah baterii a vytvořena následující charakteristika.



Charakteristika 2 : $R_i = f(\text{SoC})$ jednoho 3.2 V článku LiFePO_4 pro MATLABový model

Hodnoty těchto charakteristik byly poté vynásobeny čtyřmi a vloženy do MATLABového modelu pro modelování čtyř 12 V baterií složených ze čtyř sériově řazených 3.2 V článků společně pevně zapouzdrěných v jednom boxu.

Kapacita modelovaných baterií byla pro zjednodušení výpočetní náročnosti nastavena na přibližně 20 As s předpokladem, že ostatní vlastnosti vzhledem k SoC zůstávají neměnné. Toto zjednodušení tedy poměruje simulační čas vzhledem ke skutečnému času, kdy nabíjení simulované baterie proudem 20 A trvá 1 s. Nabíjení baterie s kapacitou 90 Ah by trvalo 5 hodin.

3.3. Simulační schéma baterie s pasivním balancováním

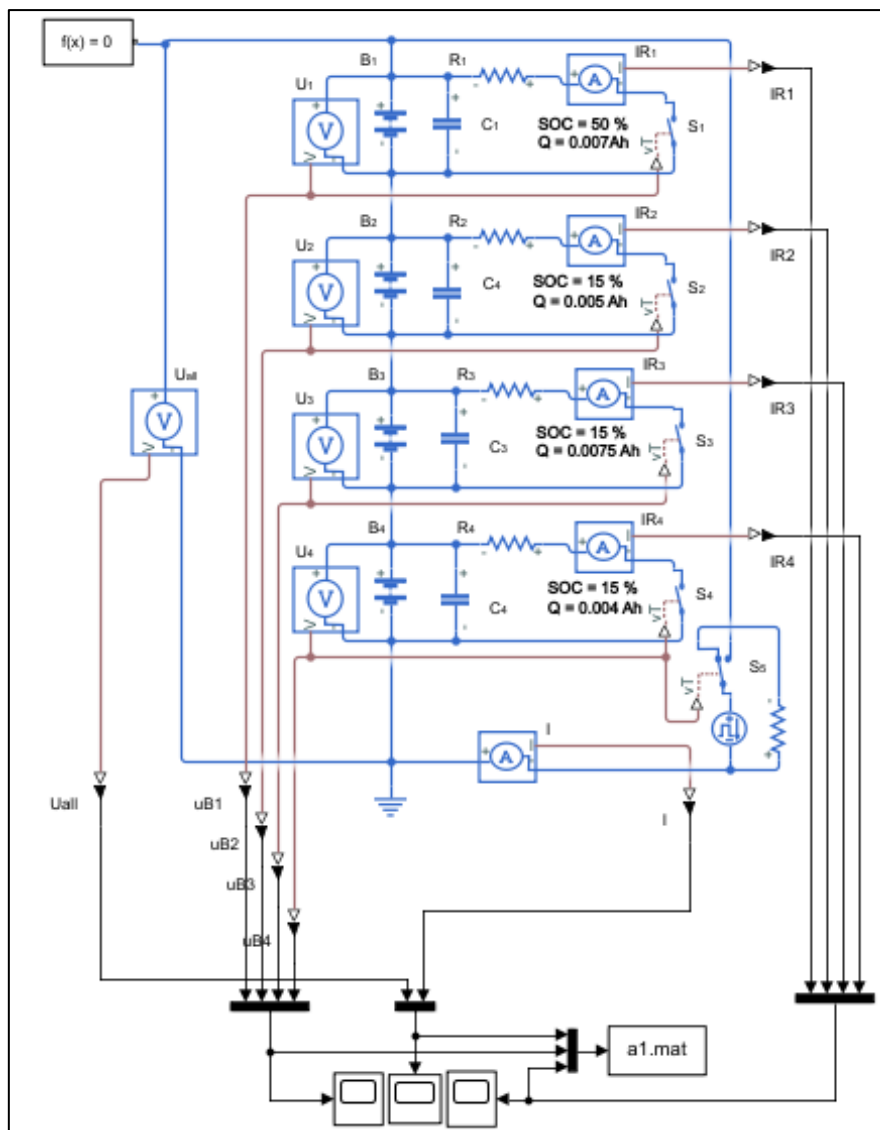


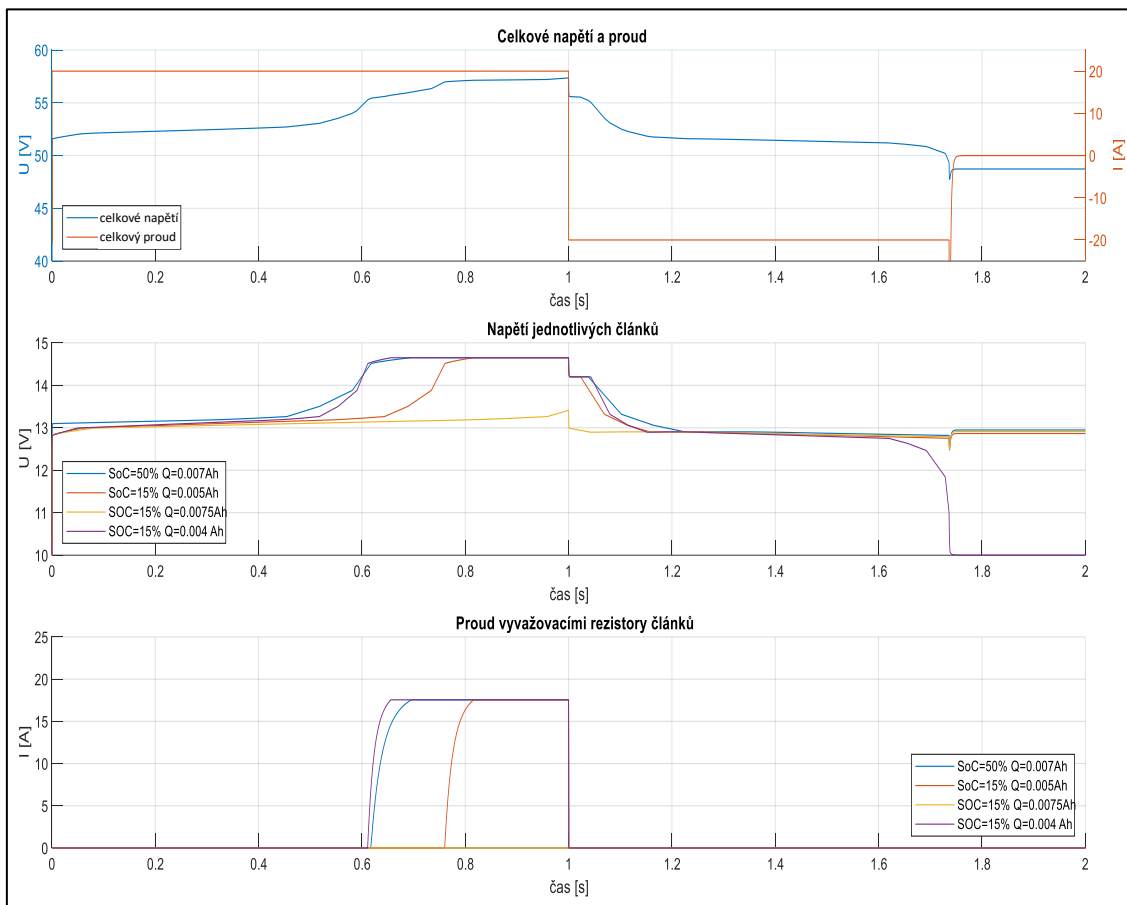
Schéma 1 : Simulační schéma 4S1P s pasivním balancováním

Na simulačním schématu je každá baterie doplněna o vyhlazovací kondenzátory o kapacitě 20 mF, balancovací rezistory o odporu 0,725 Ω, které jsou napočítané pro nabíjecí proud 20 A a napětí baterie 14,8 V a spínači, které spínají při dosažení napětí baterie 14,8 V. Pro účely analýzy jsou nastaveny bateriím různé kapacity a stavy nabití SoC.

Dále je zde sada snímačů napětí a proudu, které slouží k zaznamenání dat a řízení. Spínač S5 slouží pro odpojení baterie od zátěže při dosažení minimálního povoleného napětí na kterékoliv baterii. Zde konkrétně je připojen pouze k baterii B4, protože ta je v sérii nastavená jako kapacitně nejslabší. Ochranu vůči přebítu plní balancovací rezistory, lepší by ovšem bylo doplnit spínačem pro účel odepnutí od nabíječky.

Baterie bude nejprve nabíjena 20 A po dobu 1 s a poté vybita toutéž hodnotou proudu a tutéž dobu zdrojem proudu I. Nasbíraná data budou následně uložena pro další zpracování do souboru a1.mat.

3.3.1. Simulační výsledky baterie s pasivním balancováním



Obrázek 23 : Simulační výsledky pasivního 4S1P balancéru

Z dat nasbíraných v souboru a1.mat ze simulace byly vyneseny pomocí MATLABového skriptu průběhy z obrázku 23.

Na průběhu celkového proudu a napětí lze sledovat napětí mezi svorkami celé baterie a proud protékající baterií. Lze si všimnout, že došlo k odpojení baterie od zátěže v čase 1,73 s, což v průbězích napětí každého článku z grafu uprostřed odpovídá vybavení ochrany proti přílišnému vybití baterie B4.

Dále si lze všimnout, že baterie B4 a B1 jsou již téměř plně nabity v čase 0.6 s a dochází k přemostění těchto baterií pomocí jejich balancovacích rezistorů. Taktéž v čase 0.75 s je již nabitá baterie B2. Baterii B3 se nepovedlo v nabíjecím cyklu nabít do plna.

Kdybychom chtěli oznámkovat tento bateriový systém jako ve škole, dostal by známku nedostatečnou, a to proto, že dvě pětiny nabíjecího času dochází k maření energie na odporech a následný vybíjecí cyklus je pouze sedmi desetinový, přičemž jasně dochází k širokým nabíjecím a vybíjecím cyklům na nejslabší baterii oproti silnějším, což vede k jejímu dalšímu rychlému stárnutí. Splněno je pouze horní ztrátové balancování a podpěťové odpojení.

3.4. Simulační schéma baterie s aktivním balancováním typu fly-back

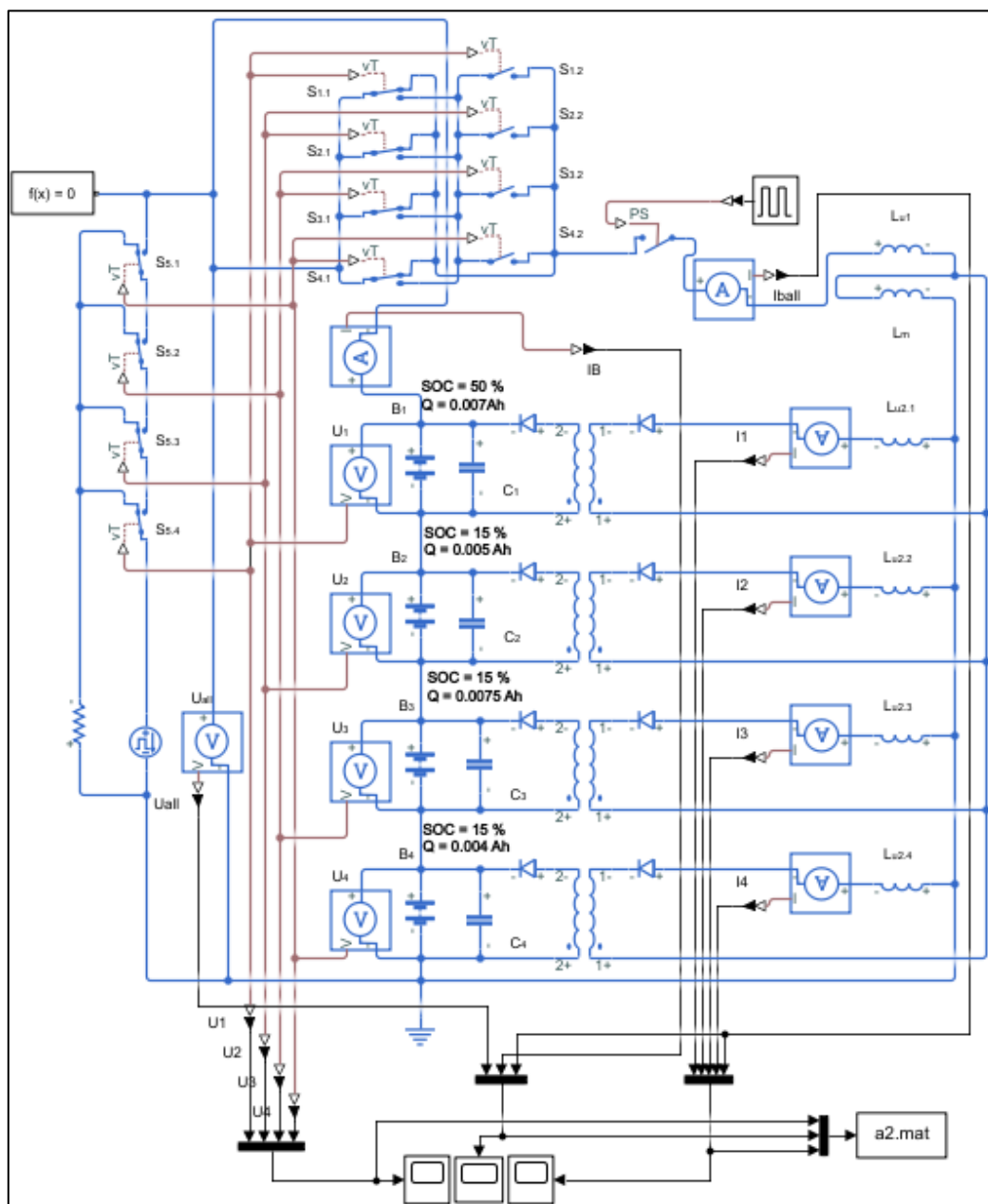
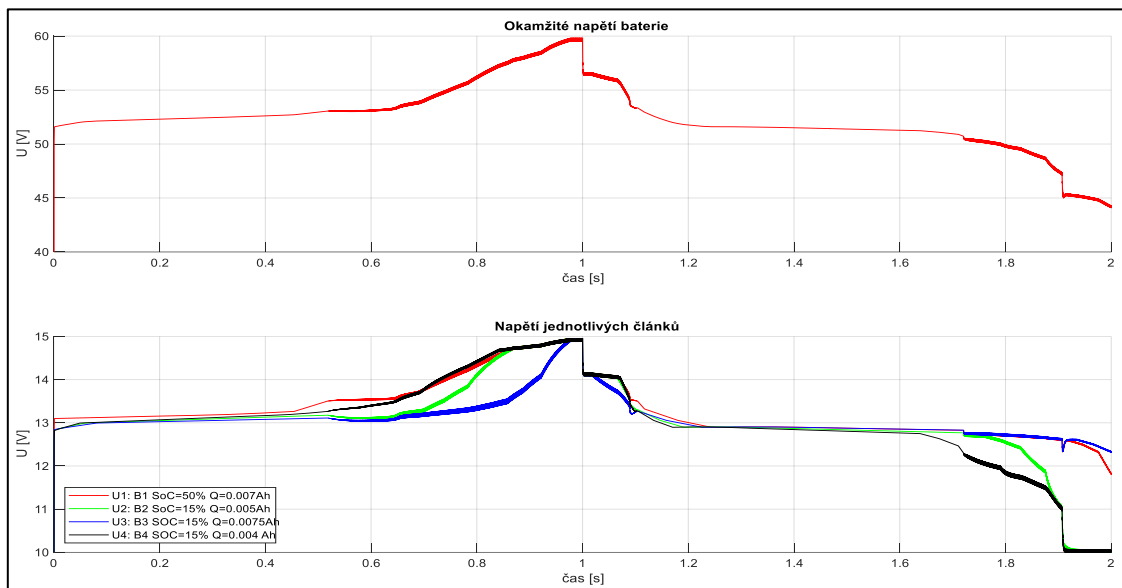


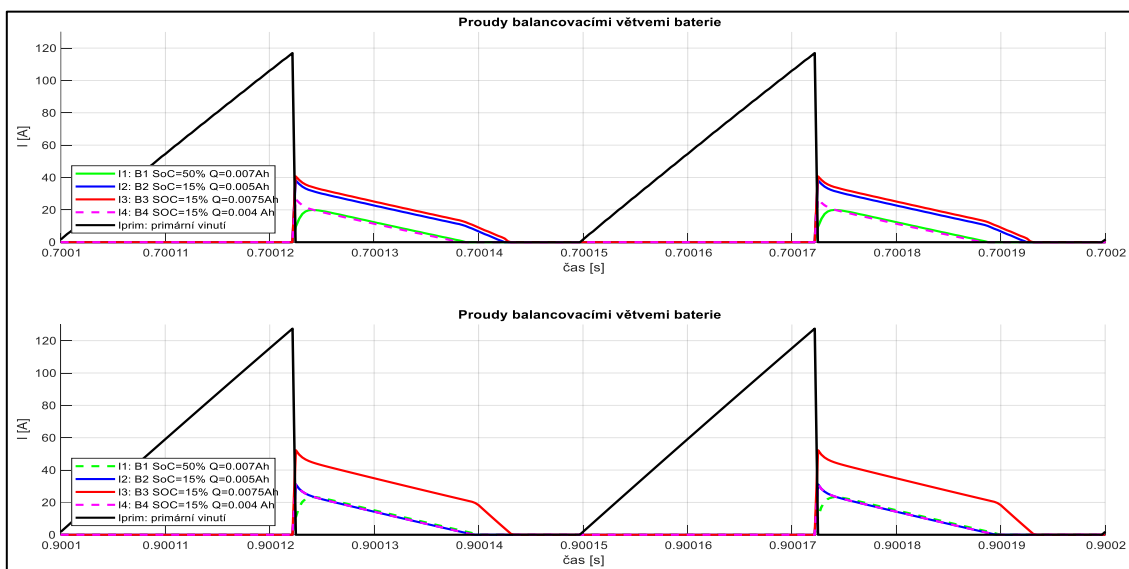
Schéma 2 : Simulační schéma 4S1P s aktivním balancováním

Simulační schéma silové části bylo převzato od konzultačního experta Ing. Jana Strossy. Bylo doplněno o měřící prvky, zátěž formou proudového zdroje, spínači S5.1-4 pro odpojení baterie od zátěže v případě přílišného vybití a spínači S1-4.1 a S1-4.2 pro hladinové řízení napětí článků, přes fly-back měnič vytvořený náhradním zapojením transformátoru Lu1, Lu2.1-4, Lm a transformátory s diodami suplující galvanické oddělení, převod a funkci blokujícího měniče.

3.4.1. Simulační výsledky baterie s aktivním balancováním typu fly-back



Obrázek 24 : Napětí celé baterie a napětí jednotlivých článků při aktivním balancování



Obrázek 25 : Detail průběhů proudů balancovacími větvemi

Z výsledků simulace plyne, že nyní se podařilo všechny články baterie plně nabít během 1 s simulačního času.

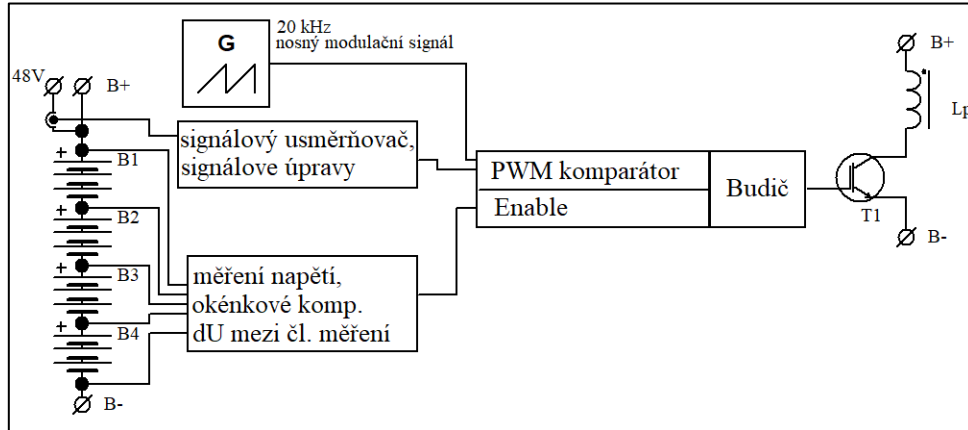
Další výhody této topologie lze pozorovat od simulačního času 0.5 s, kdy si lze všimnout, že naběhlo horní vyrovnávání balancéru nastavené na 13.5 V a drží napětí B1. Při vybíjení, které začíná od 1 s si lze všimnout, že balancér podporuje nejslabší článek B4 až do času 1.1 s, kdy už žádný článek nemá napětí vyšší než stanovených 13.5 V.

Tato topologie disponuje i možností spodního balancování, v simulaci je hranice nastavená na 11.8 V a k její aktivaci dojde v čase 1.72 s, kde lze pozorovat, jak balancér snižuje prudkost pádu napětí baterie B4.

V této simulaci byla baterie tedy plně nabita a vybíjecí čas byl 90% oproti nabíjecímu.

4. Návrh řídicího algoritmu a realizace řídicího obvodu pro aktivní fly-back balancér

4.1. Blokové schéma navrhovaného řídicího obvodu

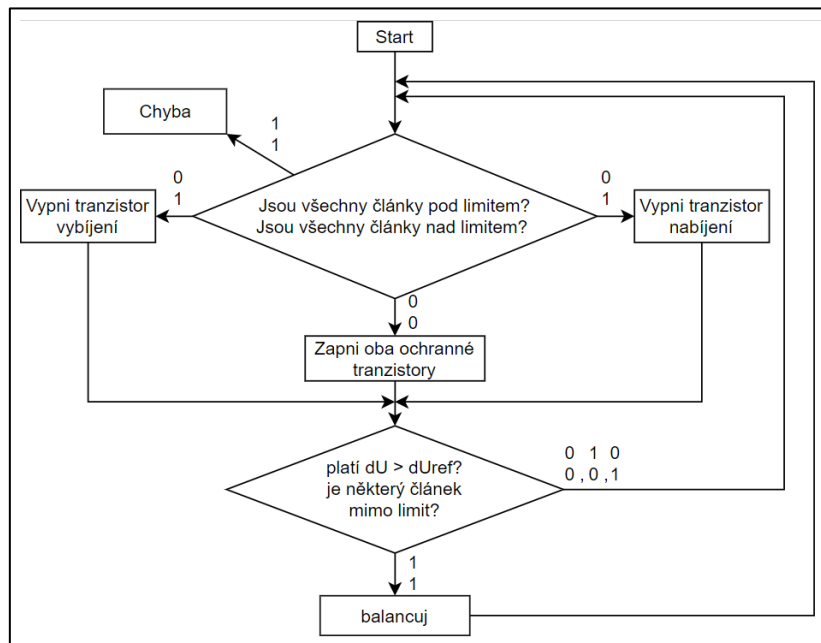


Obrázek 26 : Blokové schéma navrhovaného řízení

Blokové schéma se skládá z bloku měření napětí, který separuje a porovnává napětí na jednotlivých člancích s horní referenční hranicí, což odpovídá hornímu balancování a spodní referenční hranicí, což odpovídá spodnímu balancování. Pomocí hradel okénkových komparátoru bude realizována hladinová regulace. dU je určeno rozdílem maximálního a minimálního napětí. Signály z těchto bloku slouží k povolování funkce budiče T1.

Dále v kapitole 4.5. je využit signálový usměrňovač, který vyhodnocuje protékající proud a společně s další úpravou signálu určuje střidu PWM signálu tvořeného z generovaného nosného signálu a komparátoru.

4.2. Vývojový diagram navrhovaného řídicího obvodu



Obrázek 27 : Algoritmus hladinového řízení s hlídáním rozdílu napětí a dvoustavovým výstupem

4.3. Realizace simulačního modelu

Jako základním stavebním prvkem simulačního modelu jsou zvoleny nesymetricky napájené operační zesilovače (30 V) a logická hradla pracující s úrovní (5 V), které budou provádět požadované operace daného bloku z blokového schématu a bloky budou spojeny tak, aby plnily funkci vývojového diagramu.

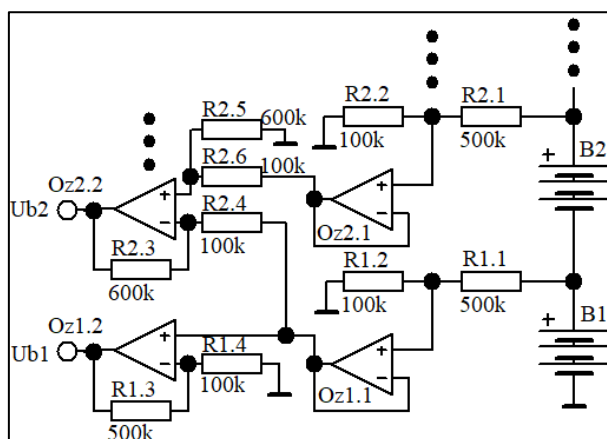
4.4. Napěťová část řídicího algoritmu

Tato část je samostatně schopná řídit balancér metodou nespojité regulace. Její základ se skládá z měřicího členu napětí jednotlivých článků a okénkové komparace s hysterezí.

Z předběžných simulací vyplynula nutnost doplnit tuto část o odepnutí baterie při dosažení horního nebo spodního napěťového limitu baterie a o vyhodnocení rozdílu mezi napěťově nejsilnějšího a nejslabšího článku v sérii.

4.4.1. Měření jednotlivých napětí článků

Pro měření napětí jednotlivých článků je využito odporových děličů vztažených k záporné svorce bateriové série, napěťových sledovačů pro impedanční oddělení, jednoho neinvertujícího zesilovače a tří rozdílových zesilovačů pro 4S1P baterii.



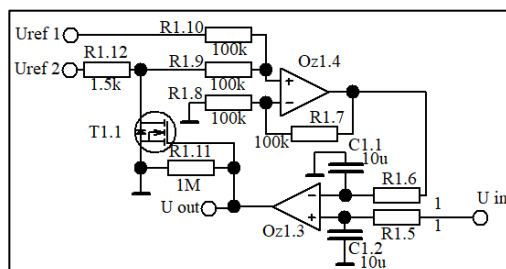
Obrázek 28 : Zapojení pro měření jednotlivých napětí v baterii

Dělicí poměr děličů musí být navržen tak, aby výstupní napětí pro nejvyšší baterii bylo nižší než maximální vstupní napětí sledovačů Oz1.1 a Oz2.1 sloužících k impedančnímu oddělení. Následně je vhodné volit zesílení neinvertujícího zapojení Oz1.2 ($A = 1 + 5/1 = 6$) tak, aby kompenzovalo útlum děliče ($A = 1/6$). Totéž je nutné pro ostatní stupně, kde zesílení rozdílového zesilovače je ($A = R2.3/R2.4 = 6$) za podmínky ($R2.5/R2.6 = R2.3/R2.4$).

Tento obvod tvoří základ BMS, jehož výstupy je možné zavést na analogové vstupní obvody mikrokontroleru a provádět sběr dat napětí jednotlivých článků nebo případné redundantní řízení. V této práci však poslouží k interpretaci zpětnovazební veličiny regulované struktury.

4.4.2. Okénková komparace s nastavitelnou hysterezí

Pro tento účel poslouží komparátor se součtovým zesilovačem, tranzistorový spínač a dvě referenční napětí. Komparátor si dle výsledku komparace přes spínač mění referenční napětí poskytované součtovým zesilovačem, čímž vzniká hystereze přímo nastavitelná referenčními napětími.



Obrázek 29 : Komparátor s hysterezí nastavitelnou pomocí součtového zesilovače a dvou referenčních napětí

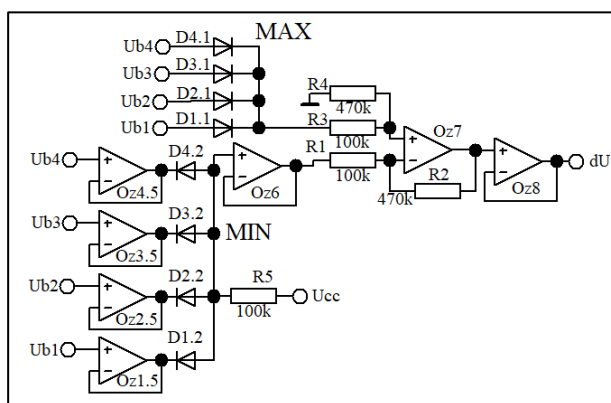
Velice důležité je přidat na vstupy Oz1.3 filtr (C1.1, C1.2, R1.6, R1.5) typu dolní propust, protože teoretický ideální Oz má nekonečné zesílení, a tedy jakékoliv zašumění na vstupu těchto komparátoru povede k nestabilitě výstupního napětí a tím i nestabilitě jeho reference. Zároveň není radno vstupy Oz1.3 příliš zatlumit, aby nedocházelo ke kmitání vlivem nastavení zpětnovazební sítě.

Pro uskutečnění hladinové regulace je toto zapojení použito dvakrát, jednou pro hlídání horní meze napětí a druhá pro spodní mez napětí. Výsledky o úrovních 0 V nebo 30 V jsou přes dělič spojeny s logickými hradly pracující s úrovněmi 0 V a 5 V, čímž vzniká okénková komparace. Další hradla následně plní funkci řízení.

Vzhledem k regulační terminologii tento člen obsahuje žádanou hodnotu, což odpovídá komparačnímu okénku a jeho výstupem je regulační odchylka.

4.4.3. Člen maximálního a minimálního napětí v sérii s hlídáním rozdílu napětí

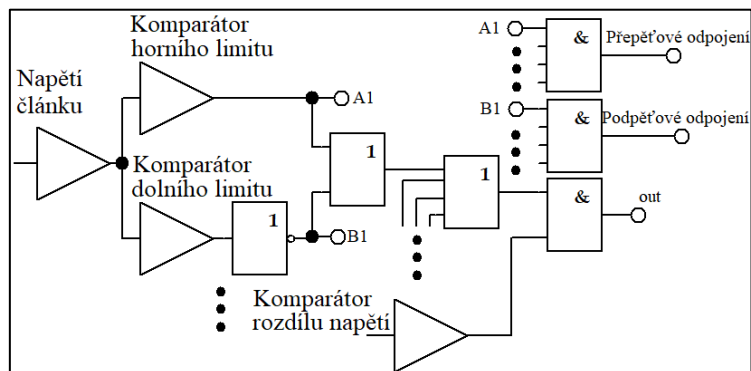
Pro určení maximální a minimální hodnoty napětí lze snadno využít diody a je důležité dbát na impedanční oddělení. Na obrázku níže je použité zapojení, kde impedanční oddělení zajišťují Oz6 a Oz8. Výstup rozdílového zesilovače tohoto obvodu má mírné zesílení ($A=4$) a je zapojen do komparátoru z předchozí kapitoly s nastavenými příslušnými limity.



Obrázek 30 : Zapojení pro určování maximálního a minimálního napětí a jejich rozdílu

4.4.4. Vyhodnocovací výstupní člen napěťové regulace

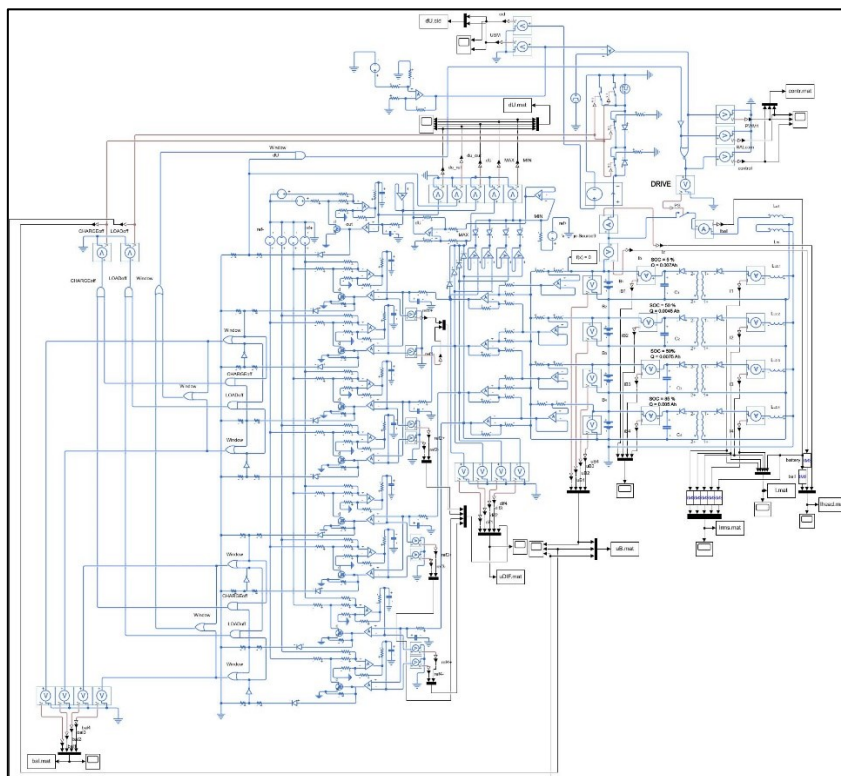
Výsledky komparací 0 V až 30 V jsou napěťově sníženy odporovým děličem 25 k Ω a 5 k Ω na hodnoty 0 V až 5 V a zpracovávány logickými hradly tak jak ukazuje obrázek níže.



Obrázek 31 : Zjednodušené schéma zapojení vyhodnocovacího členu s předchozími členy

4.4.5. Simulační výsledky

Z částí zmíněných v předchozích kapitolách byl vytvořen následující simulační model zobrazený na následujícím obrázku.

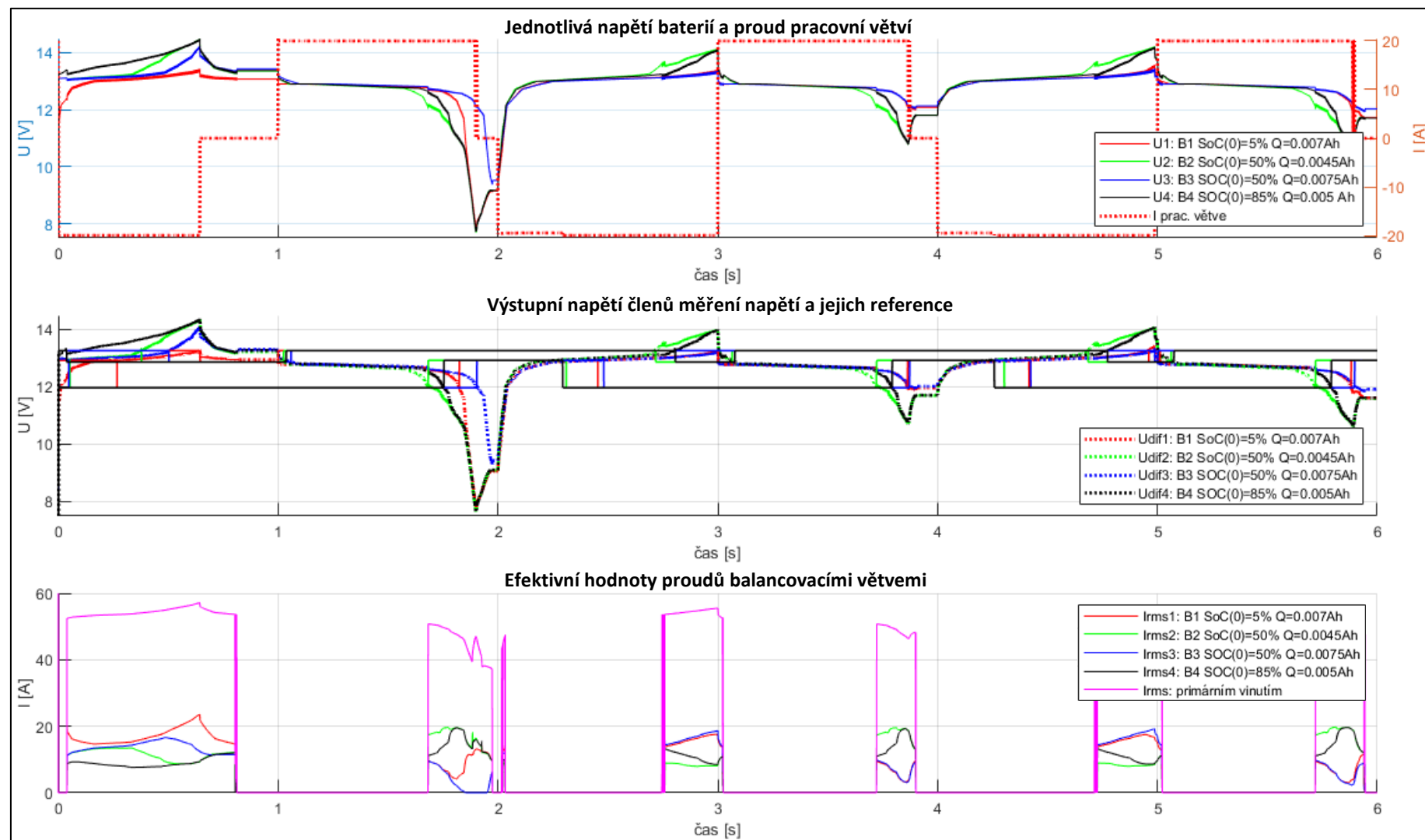


Obrázek 32: Přehledový snímek kompletního simulačního modelu

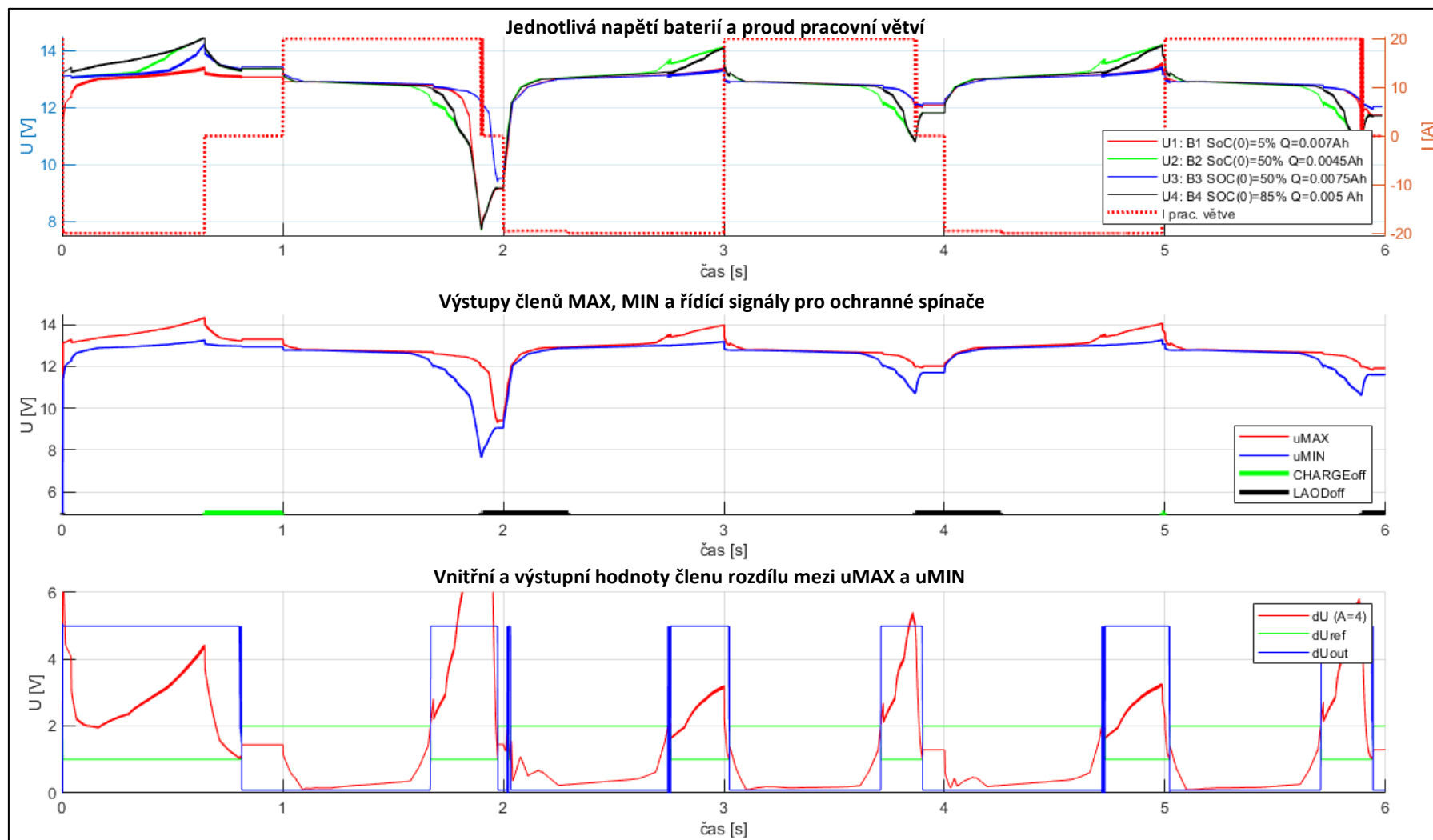
Hodnota střídá je trvale nastavena na hodnotu 50% a jsou pozorovány napětí a proudy jednotlivých baterií, výstupní i vnitřní hodnoty řídicích členů.

Kapacity baterií jsou sníženy pro možnost krátké simulace za předpokladů jako v kapitole 3.1. a jejich parametry SoC a kapacity jsou nastaveny různě.

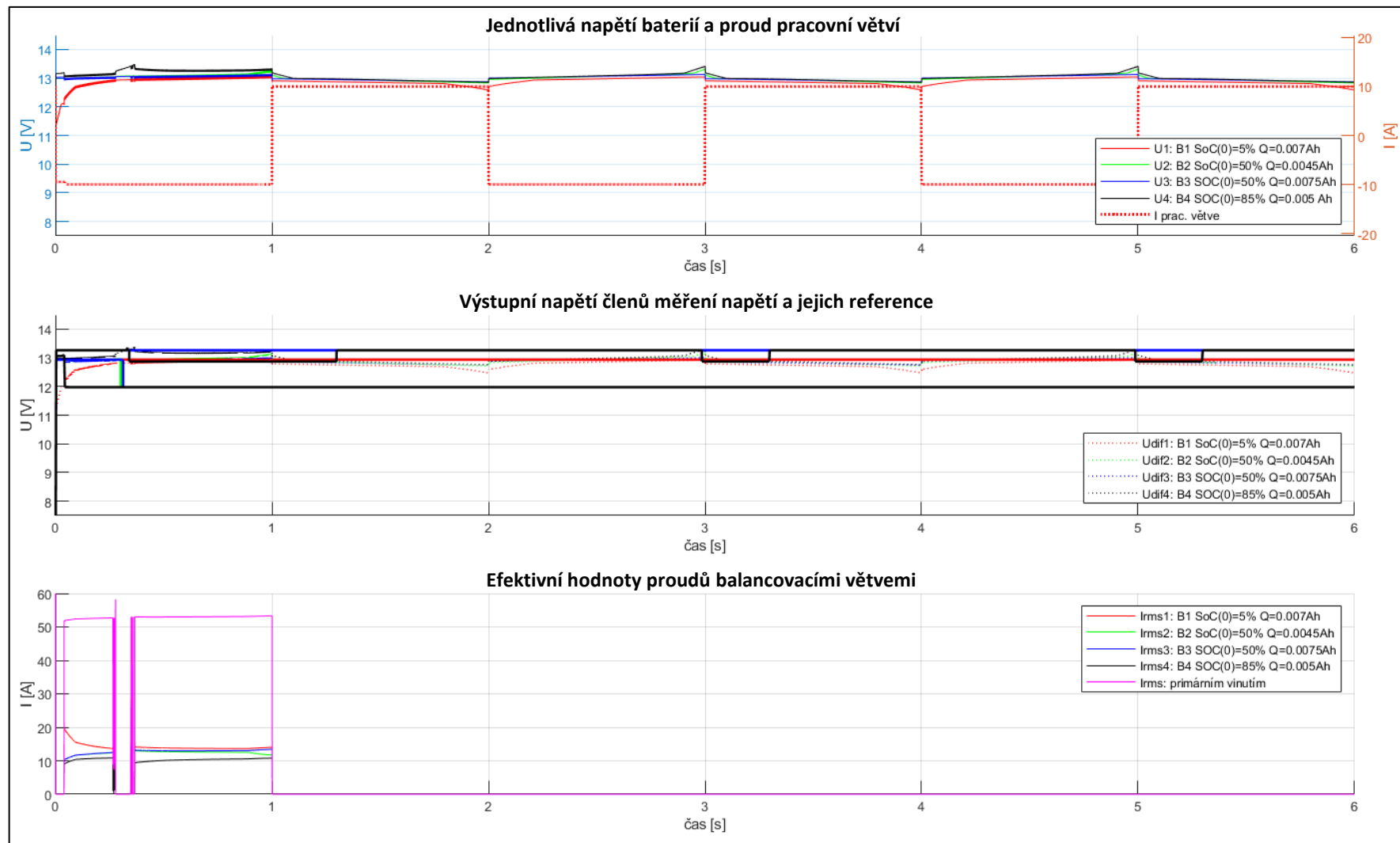
Série je zatěžována a dobíjena zdrojem proudu s periodou 2 s.



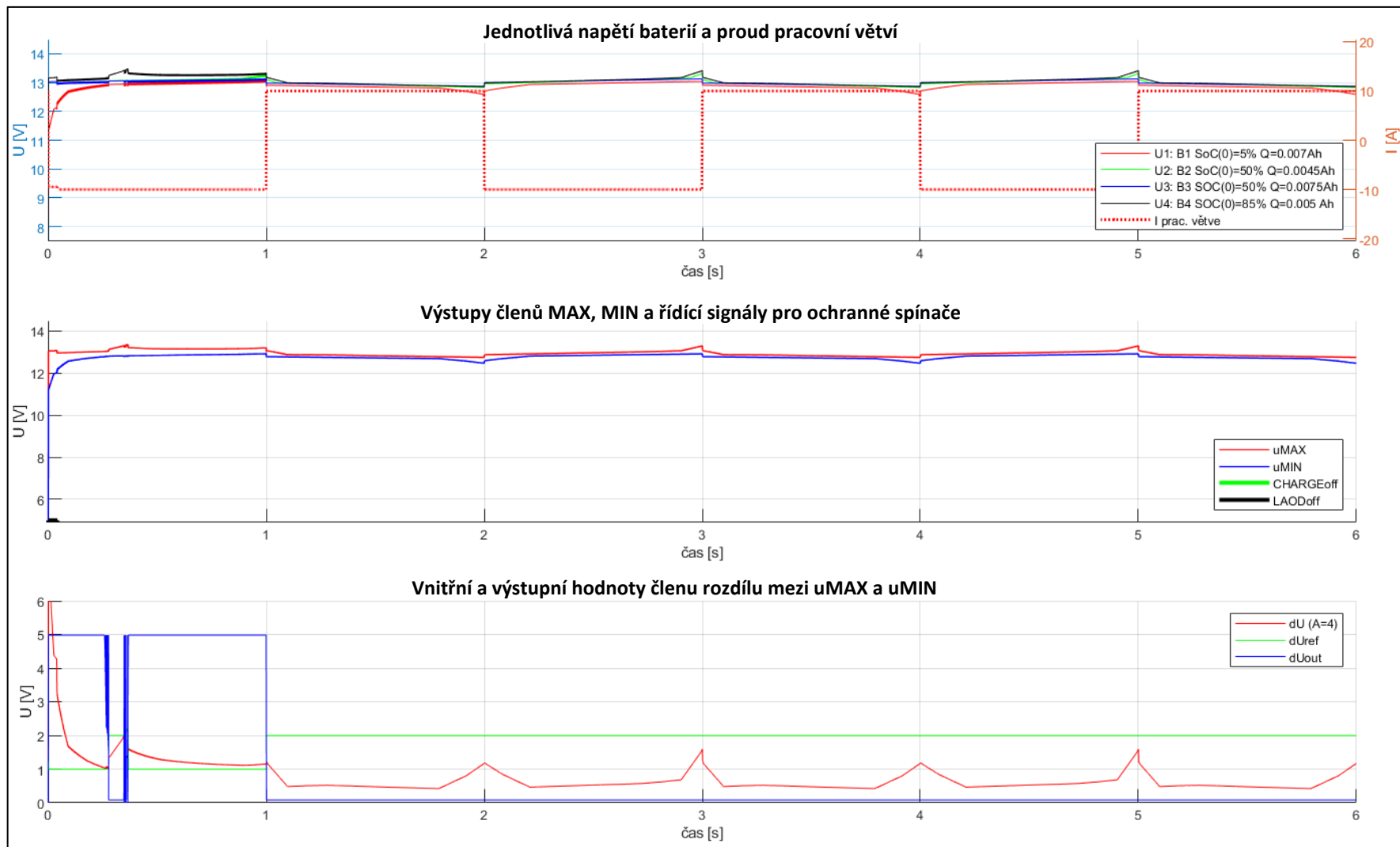
Obrázek 33 : Simulační výsledky hladivé regulace s hlídáním dU pro obdélníkový proud s amplitudou 20 A (napětí a proudy)



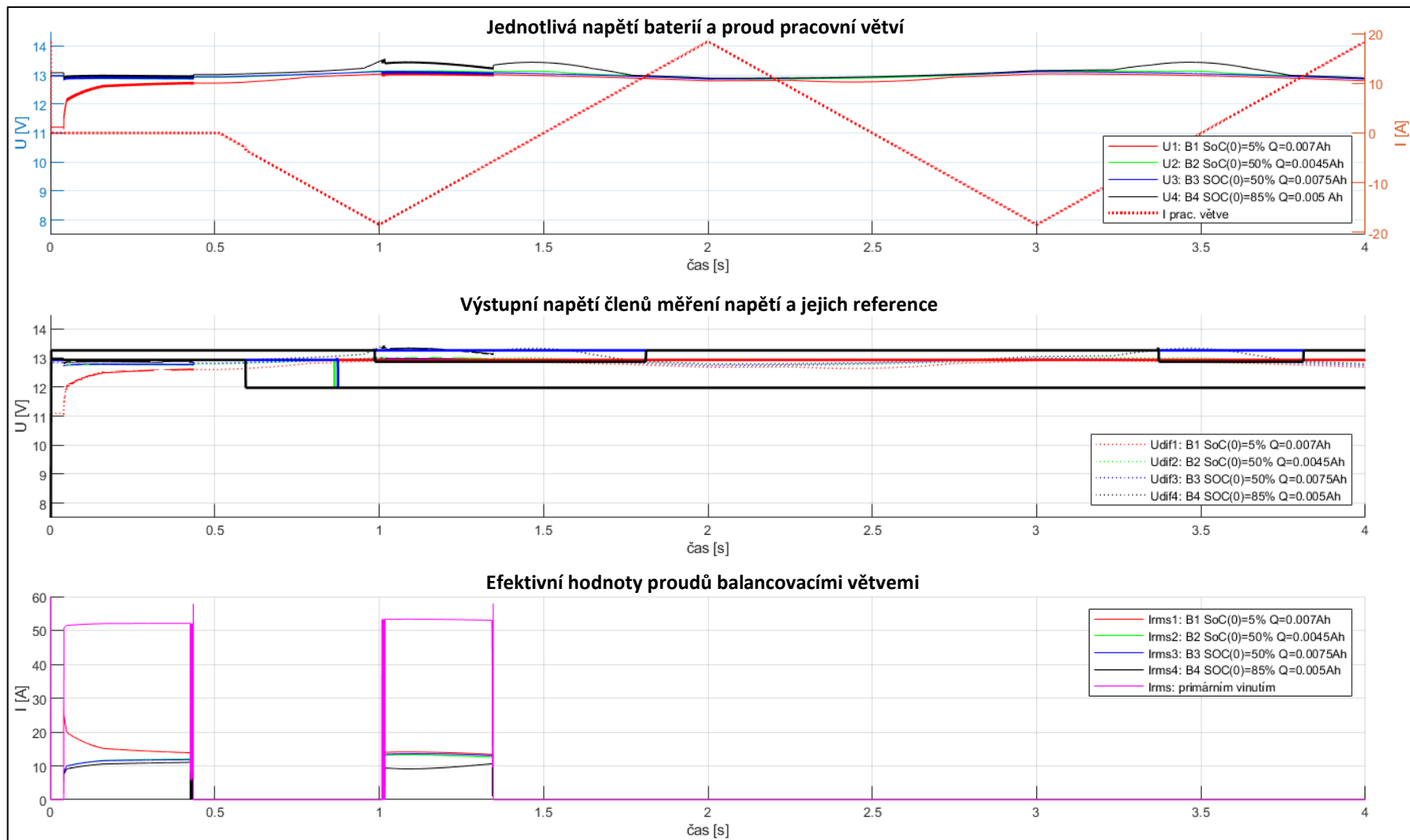
Obrázek 34 : Simulační výsledky hladivé regulace s hlídáním dU pro obdélníkový proud s amplitudou 20 A (vnitřní veličiny)



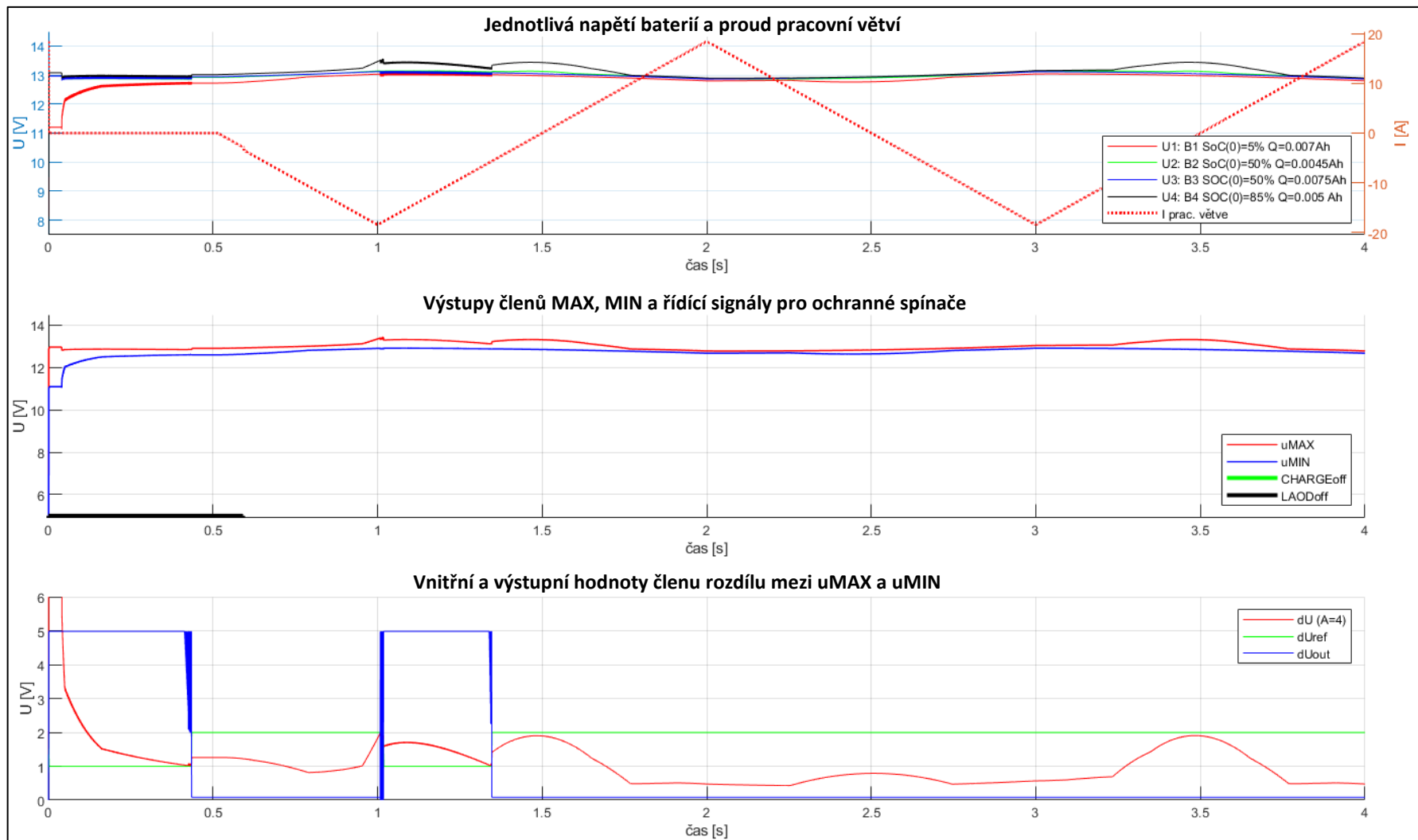
Obrázek 35 : Simulační výsledky hladivé regulace s hlídáním dU pro obdélníkový proud s amplitudou 10 A (napětí a proudy)



Obrázek 36 : Simulační výsledky hladivé regulace s hlídáním dU pro obdélníkový proud s amplitudou 10 A (vnitřní veličiny)



Obrázek 37 : Simulační výsledky hladivé regulace s hlídáním dU pro trojúhelníkový proud s amplitudou 18,5 A (napětí a proudy)



Obrázek 38 : Simulační výsledky hladivé regulace s hlídáním dU pro trojúhelníkový proud s amplitudou 18,5 A (vnitřní veličiny)

4.4.6. Popis simulačních výsledků

Z výsledku lze pozorovat, že navržený obvod plně splňuje funkci navrženého algoritmu a dochází k vyvažování napětí jednotlivých baterií v sérii i vybavení ochranných funkcí.

Na prvním průběhu v obrázku 34 lze vidět přímo získaná napětí na jednotlivých bateriích a proud protékající pracovní větví bateriové série. Bateriová série je periodicky nabíjena proudem 20 A a po uplynutí jedné sekundy vybíjena proudem 20 A taktéž jednu sekundu.

Na obrázku 34 v druhém průběhu je výstup členů maximálního a minimálního napětí a úrovně signálů pro ochranný obvod. Lze zde snadno pozorovat, kdy dochází k odpojení baterie od pracovní větve za pomoci signálu CHARGEoff, LOADoff ekvivalentním obvodem, jako je na obrázku 7. Vybavení těchto dvou signálů způsobí to, když všechna měření napětí překročí nastavené limity viz. zapojení na obrázku 31.

Balancovací efekt lze detailněji pozorovat z třetího průběhu na obrázku 33, kde jsou zobrazeny efektivní hodnoty balancovacích proudů balancovacími větvemi. Lze si zde všimnout, že výkonový obvod balancéru rozděluje proud na sekundární straně transformátoru dle okamžitého napětí připojených k sekundárním vinutím. Lze si taktéž povšimnout, že vzhledem k velikosti balancovacího proudu dochází k redistribuci nejen do slabších článků, ale i v menší míře zpět do silnějšího článku.

V posledním průběhu na obrázku 34 jsou zobrazeny vnitřní hodnoty a výstup členu rozdílu maximálního a minimálního napětí. Snadno zde pozorovat nastavitelnou hysterezi na signálu dUref, která je aplikovaná i při měření limitů napětí a výstupní signál dUout, který má podíl na vzniku regulační odchylky.

Signál dU lze považovat za ukazatel kvality redistribuce mezi články, protože, jak si lze všimnout, v simulačním čase 1,9 s, kde jeho hodnota vystoupala mimo oblast grafu, je balancovací proud I_{rms3} třetího článku, který je právě nejsilnější, nulový a dobíjí skrze balancér zbytek vybité baterie. Kdyby takovýto stav provozu přetrvával, bylo by vhodné tuto kapacitně nejsilnější baterii vyměnit za slabší, aby nedocházelo k jejímu zbytečnému zrychlenému opotřebení, kdy při vybíjení bude tato baterie v tomto zapojení s tímto algoritmem podporovat zbytek série.

V opačném extrému je tento silový obvod schopen i podporovat a držet kapacitně slabý článek v sérii což lze vidět na průbězích B2 kde zpomaluje jeho rychle nabíjení redistribuci do pomaleji nabíjejících se kapacitně silnějších článků. Při vybíjení si lze všimnout, že dochází naopak k podpoře této kapacitně slabší baterie.

Jediné, co nemusí být na první pohled z průběhů patrné je vybavení napěťových limitů. Na druhém průběhu z obrázku 33 lze pozorovat změny referenčních hodnot vždy barvově shodná pro danou baterii, která právě ve chvíli změny tohoto referenčního napětí dochází k překročení nebo návratu limitů.

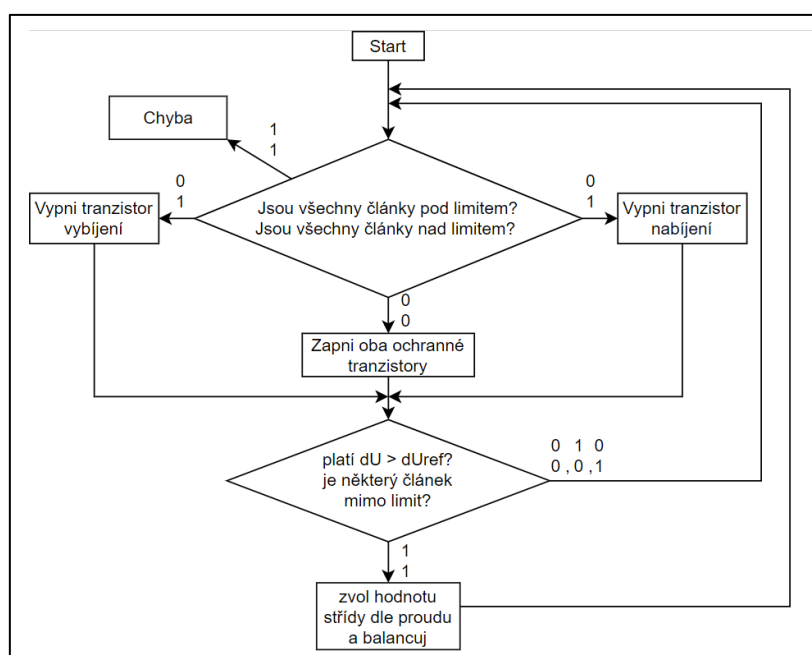
Celkově si také lze všimnout, že se průběhy při druhé a třetí periodě velice podobají a směřují k optimalizaci časové využitelnosti baterie.

Při simulaci s menšími proudy si lze všimnout, že balancér ze začátku vyváží baterii a dále je nečinný.

4.5. Regulace odchylky dle proudu

Pro zlepšení vlastností regulace lze přidat proudové čidlo do pracovní proudové větve. Vzhledem k implementaci ochranných spínačů lze při známe hodnotě R_{dson} měřit nepřímou metodou proud přímo na těchto spínačích. Tento krok pozmění algoritmus jen v jeho úplně posledním kroku.

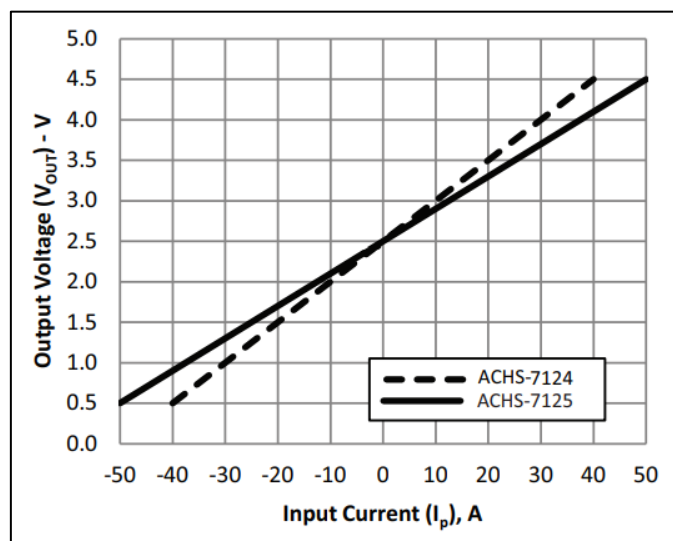
Výstup tohoto měření bude sloužit ke snížení velikosti akční veličiny (zvolené střidy) při různých proudech.



Obrázek 39 : Algoritmus hladinového řízení s hlídáním rozdílu napětí a volbou střidy dle proudu

4.5.1. Zpracování signálu z proudového čidla

Signál čidla proudu je simulován proudem řízeným zdrojem napětí sériově zapojeného řídicími vstupy do pracovní větve baterie. Jako předloha pro tento způsob simulace byla použita převodní charakteristika integrovaného hallova snímače proudu ACHS-712/7125 [20].

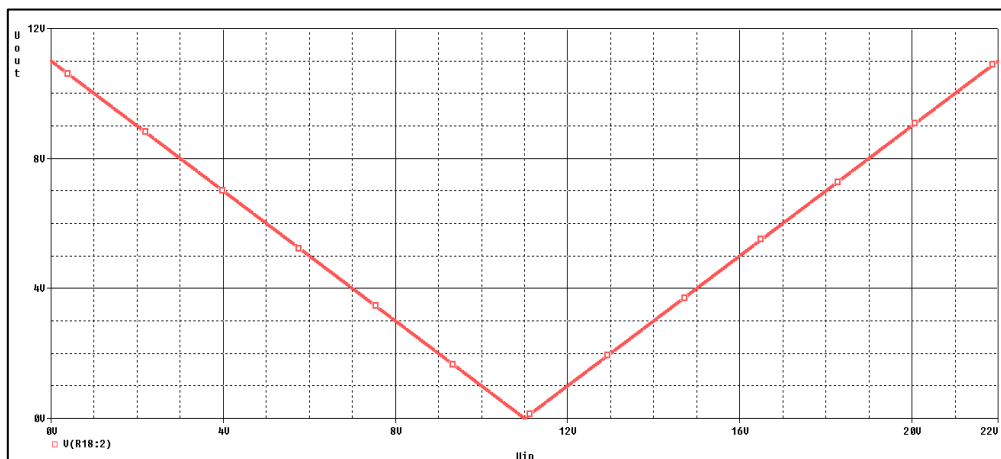


Obrázek 40 : Převodní charakteristika z dokumentace integrovaného hallova snímače proudu [20]

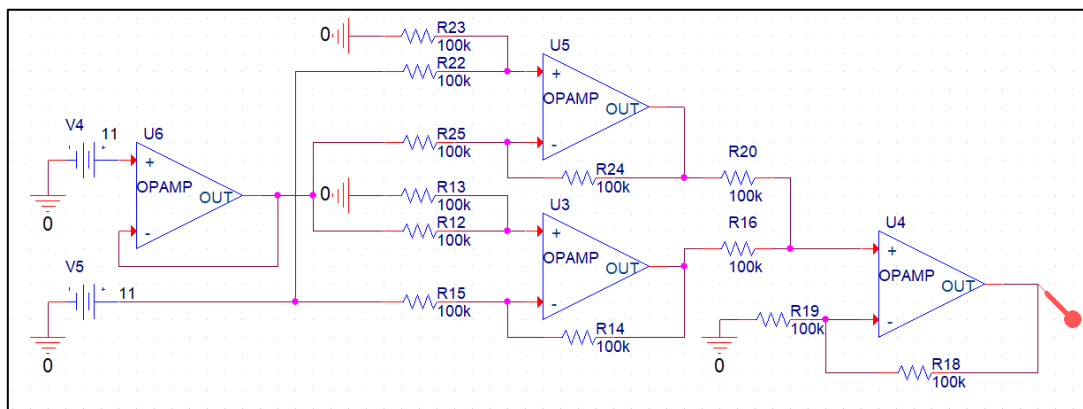
Výstup snímače V_{out} v MATLABovém modelu je modelován závislostí (9) na vstupním proudu i_{in} , kdy první koeficient ($p_{(0)} = 11$) je offset signálu a druhý ($p_{(1)} = 0.5$) zesílení.

$$V_{out} = p_{(0)} + p_{(1)} \cdot I_{in} \quad (9)$$

Tento signál je při zpracování nutné rozdělit na část odpovídající zápornému proudu a druhou část, která odpovídá proudu kladnému, jinak řečeno je zapotřebí člen absolutní hodnoty laděného pro daný snímač.



Obrázek 41 : Převodní charakteristika členu absolutní hodnoty pro úpravu signálu ze snímače proudu



Obrázek 42 : Simulační zapojení členu absolutní hodnoty pro úpravu signálu snímače proudu

Obvod z obrázku 42 lze také použít jako frekvenční násobičku. Když bude vstup (kladný vývod zdroje V5) buzen signálem s frekvencí 4 Hz a středem amplitudy stejným jako je výstupní napětí operačního zesilovače U6, tak na výstupu U4 bude signál s dvojnásobnou frekvencí, tedy 8 Hz. Rezistory R19 a R18 lze v případě potřeby volit zesílení výstupního signálu.

4.5.4. Převod veličiny proudu na hodnotu požadované střídavy

Když už je známa hodnota proudu zátěže, je třeba zvolit hodnotu balancovacího proudu. Zde je nutné si uvědomit, že primární vinutí o dané indukčnosti L je buzeno obdélníkovým napětím u baterie a hodnota proudu $i_{L(t)}$ bude s časem lineárně narůstat (10).

$$i_{L(t)} = \frac{1}{L} \int_0^t u_{(t)} dt + i_{L(0)} = \frac{1}{L} \cdot U \cdot t \quad (10)$$

Cílová hodnota $i_{L(t)}$ je ta, které se její efektivní hodnota rovná nebo je o něco vyšší než hodnota proudu pracovní větvi baterie.

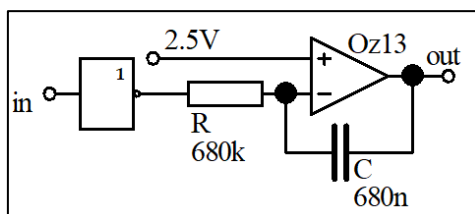
Pro zjednodušení lze hodnotu určit za podmínek, kdy efektivní nabuzená hodnota proudu ve spínací periodě odpovídá čtvrtině amplitudy nabuzeného okamžitého proudu, to znamená, že okamžitá amplituda musí být čtyřnásobná oproti proudu pracovní větve baterie.

Pro účely simulačního modelu je zesílení U_4 z obrázku 42 nastaveno na ($A=0,25$), což odpovídá střídě 50 % pro proud 20 A.

4.5.5. Integrační člen pro eliminaci odchylky

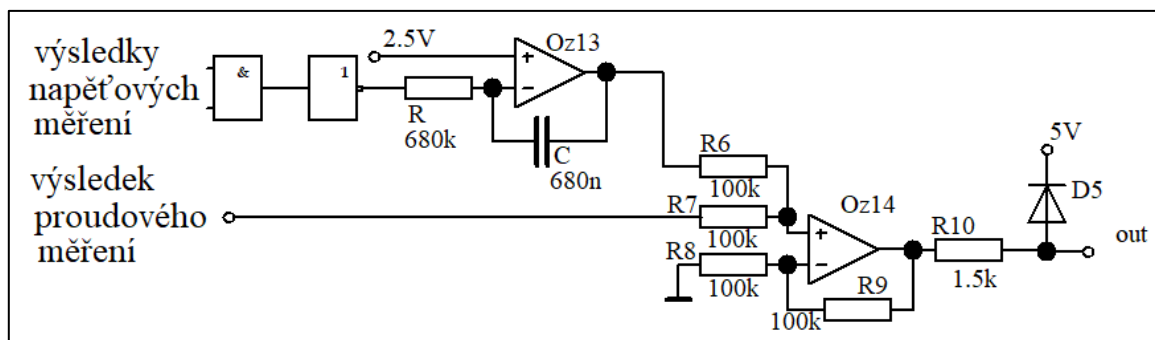
Vzhledem k jednoduchosti volby střídý můžeme počítat, že při dlouhodobém provozu baterie a snížení celkového napětí baterie při vybíjení dojde k nedostatečně rychlému přelévání energie mezi články, což povede k vybavení ochran a k odstavení baterie od zátěže či nabíječky.

Pro eliminaci této chyby je vložen pomalý integrační článek, který postupně navyšuje akční veličinu.



Obrázek 43 : Integrační člen pro nesymetrické napájení

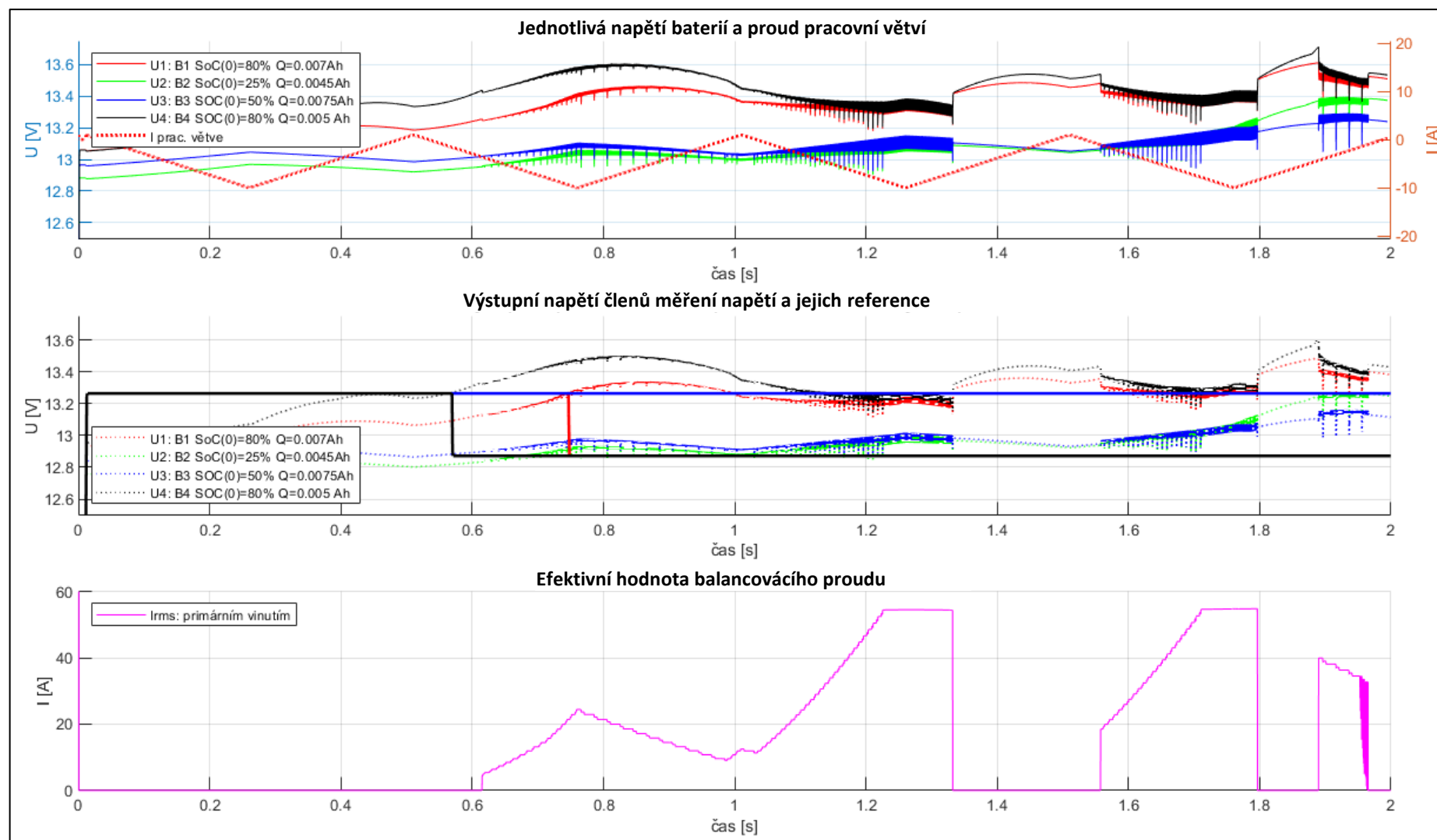
Akční veličina je vytvořena následujícím obvodem a na výstupu je omezena z důvodu bezpečnosti na 5 V. Je vhodné taktéž Oz13 napájet 5 V, aby jeho saturační výstupní napětí nebylo zbytečně vysoké.



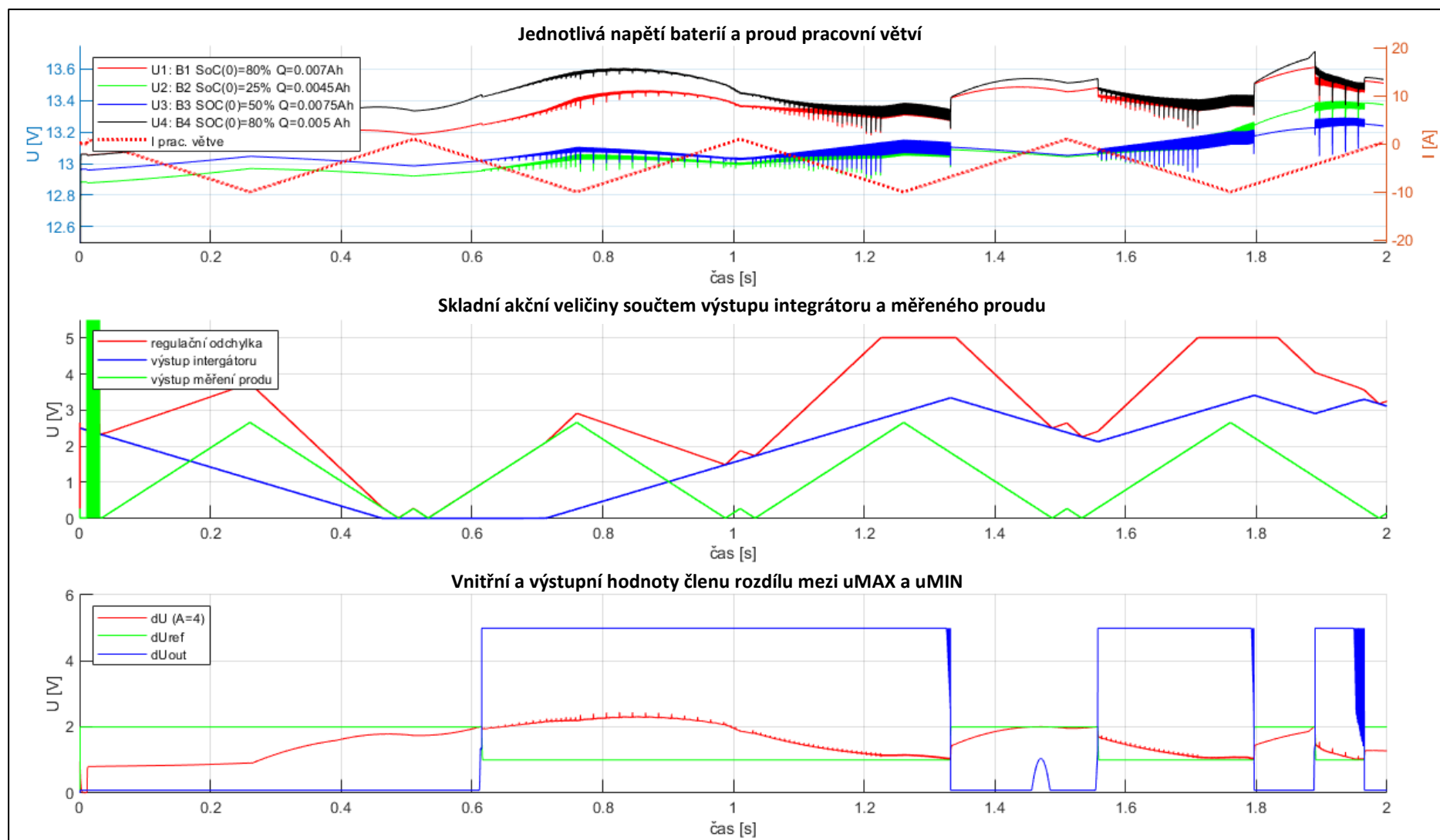
Obrázek 44 : Součet regulační odchylky proudového měření a integračního členu tvořící akční veličinu

4.5.6. Simulační výsledky

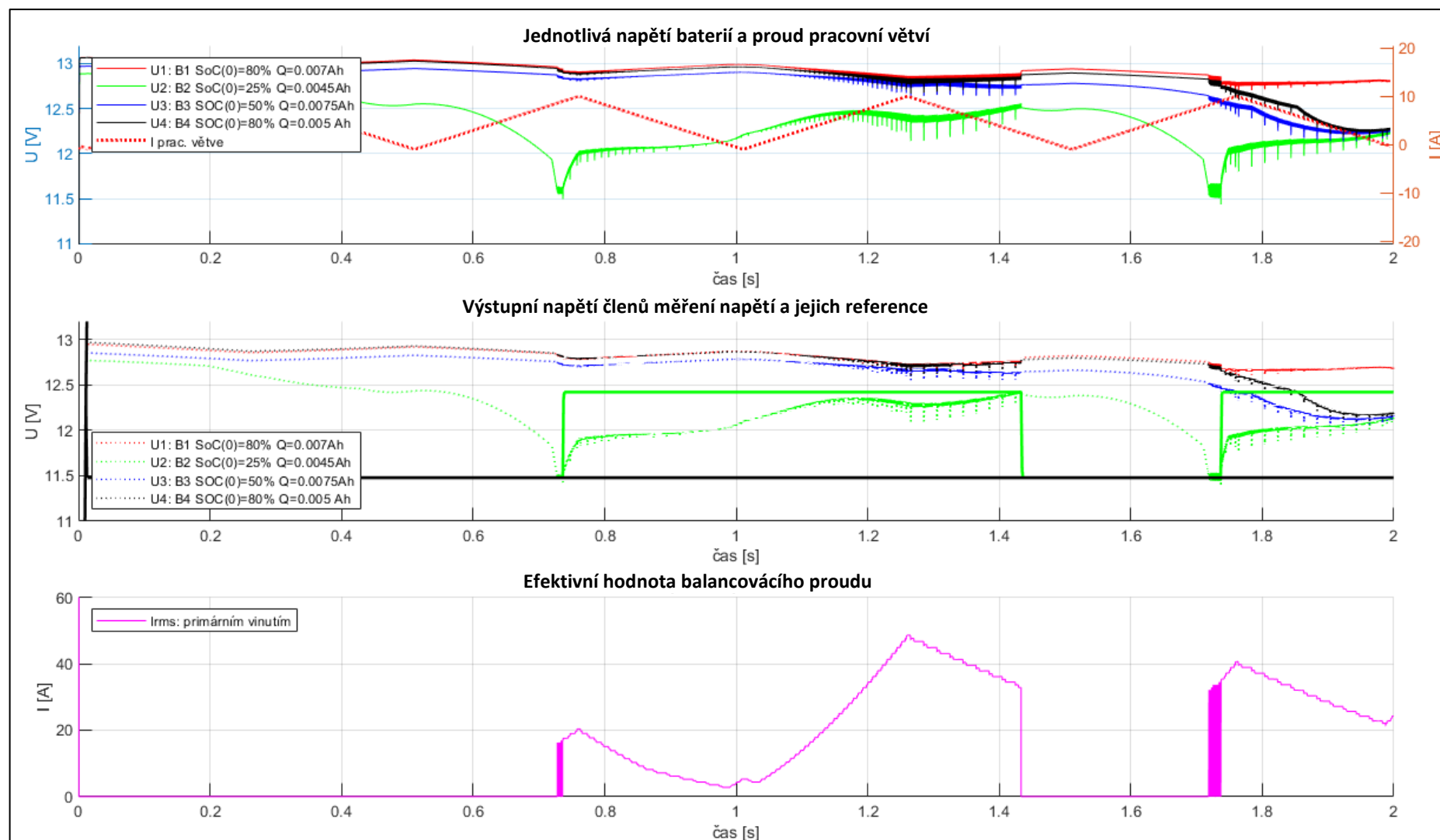
Navržený obvod byl simulačně testován pro trojúhelníkový průběh proudu s amplitudou 11 A offsetem -1 A jednou pro nabíjení a podruhé pro vybíjení. Jsou sledovány napětí jednotlivých článků a proud primárním vinutím Tr_1 , napětí podílejší se na volbě střídý a výsledky obvodu pro rozdíl napětí.



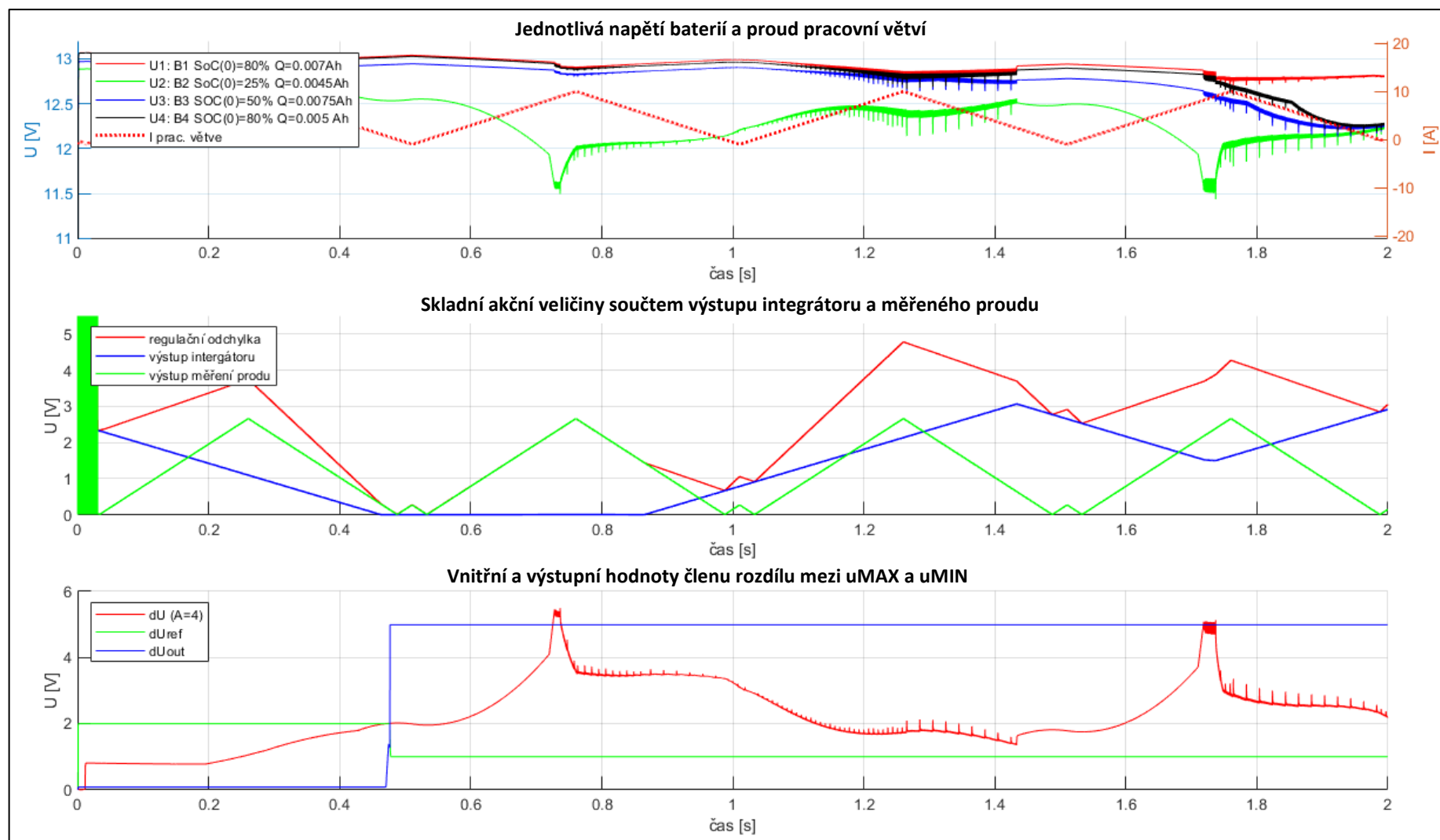
Obrázek 45 : Simulační výsledky regulace dle proudu při nabíjení 10 A (napětí a proud primárním vinutím)



Obrázek 46 : Simulační výsledky regulace dle proudu při nabíjení 10 A (regulační veličiny)



Obrázek 47 : Simulační výsledky regulace dle proudu při vybíjení 10 A (napětí a proud primárním vinutím)



Obrázek 48 : Simulační výsledky regulace dle proudu při vybíjení 10 A (regulační veličiny)

Závěr:

Zaměření této práce na LiFePo_4 je zásah do soudobě velice aktuálního tématu, čím bych ještě jednou rád poděkoval vedoucímu práce Panu Ing. Vladislavu Damci, Ph.D. za pěkné zadání.

Tyto články lze snadno zakoupit s kapacitami od 6Ah po 106Ah v cenovém rozmezí do čtyř tisíc českých korun, a to bez jakýchkoliv ochranných obvodů. Je také zřejmé, že ne všechny komerčně dostupné baterie toho typu budou nové nebo budou dodány s podrobnou dokumentací a aplikačními pokyny. Lze do budoucna počítat s rozvojem tzv. baterio-amatérismu podobně jako to bylo a je s rádio-amatérismem. Předznamenává to hlavně rostoucí dostupnost těchto baterií.

Dále vzhledem k rostoucímu trendu obnovitelných zdrojů jako jsou solární elektrárny, kdy 440 W panel stojí pět tisíc českých korun a které se čím dál častěji vyskytují i na střechách rodinných domů, jejichž součástí bývá právě bateriové uložení, je nutné, aby člověk uvažující nad zakoupením a provozováním takovýchto baterií byl seznámen s provozními limity nebo aby baterie byla schopna sama zaručit bezpečný a efektivní provoz jakýmkoliv integrovaným zařízením za jakýchkoliv podmínek.

Navržený model v této práci splňuje právě bezpečnostní požadavky vzhledem k napětí a byl simulačně několikrát ověřen. Funkce, kterých bylo dosaženo, jsou spodní balancování, horní balancování, odepnutí baterie v případě přílišného vybití a odpojení baterie při přílišném nabití. Vzhledem k variabilnosti navrženého obvodu, lze počítat nejen s aplikací pro 24 V baterie, ale i na samotné 3,2 V Lithium iontové články. Co se týče zlepšení efektivity simulovaných baterií bylo dosaženo podílu mezi nabíjecím a vybíjecím časem 90%, což rozhodně nelze docílit u hojně komerčně nabízených pasivních balancérů, se kterými lze baterii využívat jen dle jejího kapacitně nejslabšího článku.

Vzhledem k přímému přechodu z analogových vyhodnocovacích obvodů na logické úrovně, lze tento obvod přizpůsobit pro jakoukoliv balancovací topologii návrhem vhodného logického obvodu a snadno přidávat další funkce.

Co se týče dalších důležitých požadavků na BMS pro skutečný svět mimo chráněné a teplotně stabilizované podmínky laboratoří, bude nutné doplnit systém hlídáním teploty baterií, a to hlavně nízkých teplot, kdy dochází k zpomalení pohybů iontových částic a vyššímu usazování Lithia na elektrodách „Lithium metal plating“ [21] při nabíjení. Vysoké teploty jako 30°C a více vedou k urychlení stárnutí elektrolytu. Nicméně bezpečnostní obvody pro teplotu u baterii BATTLE BORN začínají omezovat provoz teprve kolem 200°C, kdy se předchází tavení separátorů [21].

Trochu znepokojivé je již při třech 24 V bateriích v sérii vzniká obvod vysokého stejnosměrného napětí. Při ceně šest set padesát korun za 20 Ah baterii by taková sestava stála osm tisíc, což vzhledem k životní úrovni v české republice jeví poměrně dostupné. Je tedy žádoucí vytvořit dokument, který bude jasně určovat a popisovat požadavky na montážní místo, pracovní podmínky montáže, montážních částí, určovat pravidla pro používané nářadí, BMS systémy a možná nebezpečí. Věřím, že tato a citované práce dopomůžou k vytvoření takového dokumentu.

Literatura:

- [1] CENEK, Miroslav. *Akumulátory od principu k praxi*. Praha: FCC Public, 2003. ISBN 80-86534-03-0.
- [2] TESSIER, Alexandre O., Maxime R. DUBOIS a João P. TROVÃO. Real-Time Estimator Li-ion Cells Internal Resistance for Electric Vehicle Application. *World Electric Vehicle Journal*. University of Sherbrooke (Canada), 2016, **2016**(Vol. 8), 7-10.
- [3] Dangerous vs. Safe batteries, Explosion and fire test! In: *Youtube* [online]. Praha: GWL, 2020, 27. 1. 2020 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://youtu.be/Qzt9RZ0FQyM>
- [4] ŁEBKOWSKI, Andrzej. Temperature, Overcharge and Short-Circuit Studies of Batteries used in Electric Vehicles. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*. 2017, **1**(5), 69-75. ISSN 0033-2097. Dostupné z: doi:10.15199/48.2017.05.13
- [5] ANSEAN, D., V.M. GARCIA, M. GONZALEZ, J.C. VIERA, C. BLANCO a J.L. ANTUNA. DC internal resistance during charge: Analysis and study on LiFePO₄ batteries. *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)* [online]. IEEE, 2013, 2013, **2013**(1), 1-11 [cit. 2021-4-24]. ISBN 978-1-4799-3832-2. Dostupné z: doi:10.1109/EVS.2013.6914746
- [6] WANG, Dian, Yun BAO a Jianjun SHI. Online Lithium-Ion Battery Internal Resistance Measurement Application in State-of-Charge Estimation Using the Extended Kalman Filter. *Energies* [online]. 2017, **10**(9) [cit. 2021-04-23]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en10091284
- [7] *PowerStream* [online]. Utah: PowerStream Technology, 2021 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.powerstream.com/LLLF.htm>
- [8] TOMASZEWSKA, Anna, Zhengyu CHU, Xuning FENG, et al. Lithium-ion battery fast charging: A review. *ETransportation* [online]. 2019, **1**(1), 14 [cit. 2021-04-23]. ISSN 25901168. Dostupné z: doi:10.1016/j.etrans.2019.100011
- [9] *Specification For LiFePO₄ Rechargeable Cell: Cell Type : CEBA1868130-10AH. A/00*. Shenzhen, 2015.
- [10] LOW WEN YAO a J. A. AZIZ. High capacity lifepo4 battery model with consideration of nonlinear capacity effects. *Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference* [online]. IEEE, 2012, 2012, **2012**(7th), 182-187 [cit. 2021-04-23]. ISBN 978-1-4577-2085-7. Dostupné z: doi:10.1109/IPEMC.2012.6258894
- [11] NG, Kong Soon, Chin-Sien MOO, Yi-Ping CHEN a Yao-Ching HSIEH. Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries. *Applied Energy* [online]. 2009, **86**(9), 1506-1511 [cit. 2021-04-23]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2008.11.021

- [12] VALDA, Lukaš. *Metody a algoritmy vyvažování sériově řazených lithiových článků*. Plzeň, 2012. Disertační práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
- [13] *Battery University* [online]. Nürnberg: Battery University, 2019 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/safety_circuits_for_modern_batteries
- [14] *RESACS* [online]. Otrokovice: RESACS, 2021 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.resacs.cz/bms-pcb-80a-3s-4s-5s-lifepo4>
- [15] *BeyondLogic* [online]. Adelaide: BeyondLogic, 2021 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.beyondlogic.org/review-li-ion-lipo-lifepo4-lithium-battery-active-equalizer-balancer-energy-transfer-board/>
- [16] SHANG, Yunlong, Qi ZHANG, Naxin CUI a Chenghui ZHANG. A Cell-to-Cell Equalizer Based on Three-Resonant-State Switched-Capacitor Converters for Series-Connected Battery Strings. *Energies* [online]. 2017, **10**(2), 1-15 [cit. 2021-4-24]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en10020206
- [17] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-86056-91-0.
- [18] MOHAMMADI, Mehdi a Martin ORDONEZ. Flyback lossless passive snubber. *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* [online]. IEEE, 2015, 2015, (1), 5896-5901 [cit. 2021-4-24]. ISBN 978-1-4673-7151-3. Dostupné z: doi:10.1109/ECCE.2015.7310487
- [19] CHEN, M. a G.A. RINCON-MORA. Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance. *IEEE Transactions on Energy Conversion* [online]. 2006, **21**(2), 504-511 [cit. 2021-4-24]. ISSN 0885-8969. Dostupné z: doi:10.1109/TEC.2006.874229
- [20] *ACHS-7124/7125: Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC*. 1. San Jose, 2020. Dostupné také z: <https://docs.broadcom.com/doc/ACHS-7124-7125-DS>
- [21] *Battleborn Battery CEO Interview! LiFePO4 Low-temp Charging, Storage, Longevity and so much more: Dennis Phares PhD* [online]. Youtube: DIY Solar Power with Will Prowse, 2020 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=ywn-vBjKbII&t=909s>
- [22] DING Xiaofeng, Donghuai ZHANG, Jiawei CHENG, Binbin WANG a Patrick Chi Kwong LUK. An improved Thevenin model of lithium-ion battery with high accuracy for electric vehicles. *Applied Energy* [online]. 2019, **254**(1), 3-4 [cit. 2021-4-29]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2019.113615

Seznam příloh:

- 1) Adresář obsahující vytvořené MATLAB simuligové modely a skripty pro zobrazení výsledků